



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO



INSTITUTO INTERAMERICANO DE
TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DEL AGUA

Maestría en Ciencias del Agua

TESIS

*Estimación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea mediante
métodos de balance hídrico en el Acuífero del Valle de Toluca*

PRESENTA:

GEOG. JOCELIN MARINA SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

Tutor Académico

Dr. Miguel Ángel Gómez Albores

Tutor Adjunto

Dr. José Luis Expósito Castillo

Índice general

Resumen.....	12
Introducción.....	13
CAPITULO I. GENERALIDADES.....	15
1.1 Importancia de la adecuada estimación de la recarga de agua subterránea en el entorno de la GIRH.....	15
1.2 Casos de estudio de la recarga y la variabilidad climática en el AVT.....	16
1.3 Justificación contextual y científica.....	18
1.4 Hipótesis.....	18
1.5 Objetivos.....	19
1.5.1 Objetivo general.....	19
1.5.2 Objetivos específicos.....	19
CAPITULO II. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	20
2.1 Características generales del Acuífero del Valle de Toluca.....	20
2.2 Edafología, clima y precipitación.....	22
2.3 Vegetación y uso de suelo.....	26
2.4 Hidrología.....	28
2.5 Geología.....	30
2.6 Hidrogeología.....	32
2.7 Usos del agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca.....	34
2.8 Características socioeconómicas.....	34
2.8.1 Demografía.....	34
2.8.2 Economía.....	36

CAPITULO III. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.....	37
3.1 Ciclo hidrológico.....	37
3.1.1 Percolación.....	37
3.1.2 Infiltración.....	38
3.2 Recarga de agua en un acuífero.....	38
3.2.1 Definición de un Acuífero.....	38
3.2.2 Recarga y descarga natural.....	39
3.3 Influencia de la variabilidad climática en la recarga.....	40
3.3.1 Temperatura.....	40
3.3.2 Precipitación.....	41
3.3.3 Evapotranspiración	42
3.4 Métodos para la estimación de la recarga.....	45
3.5 Estimación de la recarga de agua subterránea mediante los métodos de balance.....	45
3.5.1 Método de balance hídrico del suelo (hidrometeorológico).....	48
3.5.2 Método de balance hidrológico del acuífero.....	48
3.6 Retos para la adecuada estimación de la recarga de agua subterránea.....	49
3.7 Los SIG como herramienta para la estimación de la recarga.....	49
3.7.1 Información de tipo ráster y tipo vector.....	50
3.7.2 Herramientas para la interpolación de la información climática.....	50
3.7.2.1 Software ANUSPLIN.....	50
3.7.3 Módulo Earth Trends Modeler del SIG Terrset.....	52
3.7.4 Módulo Emergía del agua subterránea del SIG Terrset.....	53
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....	56
Esquema de la metodología general.....	56
4.1 Recopilación de la información.....	57

4.2	Método de balance hídrico del suelo.....	57
	Estructuración de los datos climáticos (precipitación y temperatura)	
4.2.1	para el periodo comprendido entre 1960 – 2015.....	58
4.2.2	Interpolación de la información climática mediante el método spline.....	58
4.2.3	Elaboración de los perfiles de precipitación y temperatura.....	58
4.2.4	Precipitación media y temperatura media del periodo de lluvias (mayo a octubre)	
	de ambas temporalidades (1984-1996 y 2010-2015).....	59
4.2.5	Modelo Digital de Elevación	59
4.2.6	Tipo de suelo.....	60
4.2.7	Uso de suelo.....	60
4.2.8	Determinación de la evapotranspiración, el escurrimiento	
	y la infiltración potencial del Acuífero del Valle de Toluca.....	64
4.3	Método del balance hidrológico del acuífero.....	65
	Estructuración de la información hidrogeológica del agua	
4.3.1	subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca.....	65
4.3.2	Elaboración del diagnóstico de funcionamiento de pozos, hidrogramas históricos	
	y anuales y configuración de la profundidad de los niveles piezométricos.....	66
4.3.3	Configuración de la evolución de los niveles de agua subterránea.....	68
4.4	Determinación de la recarga de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca.....	69
 CAPÍTULO V. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....		70
5.1	Método del balance hídrico de suelo.....	70
	Estructuración de los datos climáticos (precipitación y temperatura)	
5.1.1	para el periodo comprendido entre 1960 – 2015.....	70
5.1.2	Elaboración de los perfiles de precipitación y temperatura.....	71
5.1.3	Determinación de los insumos a utilizar.....	72
5.1.3.1	Precipitación media y temperatura media del periodo de lluvias	
	(mayo a octubre) de ambas temporalidades (1984-1996 y 2010-2015).....	72
5.1.3.2	Modelo Digital de Elevación.....	72
5.1.3.3	Tipo y uso de suelo.....	78
5.1.3.4	Determinación de la evapotranspiración y el escurrimiento	82
5.1.3.5	Determinación de la infiltración potencial del Acuífero del Valle de Toluca.....	87
5.2	Método del balance hídrico del acuífero.....	90

5.2.1	Elaboración del diagnóstico de funcionamiento de pozos, hidrogramas históricos, anuales y configuración de la profundidad de los niveles piezométricos.....	90
5.2.2	Diagnóstico de funcionamiento.....	92
5.2.3	Configuración de la profundidad de los niveles de agua subterránea.....	92
5.2.4	Configuración de la evolución de los niveles de agua subterránea.....	99
5.2.5	Determinación de la recarga de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca.....	105
	CAPITULO VI. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
6.1	Discusión de resultados de trabajos previos	106
6.2	Ventajas y desventajas.....	108
6.3	Conclusiones y recomendaciones.....	109
	Referencias bibliográficas.....	112
	Anexos.....	117

Índice de figuras

Figura 2.1	Ubicación del Acuífero del Valle de Toluca	20
Figura 2.2	Suelos de la zona de estudio	23
Figura 2.3	Clima de la zona de estudio	24
Figura 2.4	Precipitación total (mm/año) de la zona de estudio	25
Figura 2.5	Vegetación y uso de suelo de la zona de estudio	27
Figura 2.6	Ríos principales y cuerpos de agua de la zona de estudio	29
Figura 2.7	Material geológico superficial de la zona de estudio	31
Figura 2.8	Hidrogeología de la zona de estudio	33
Figura 2.9	Proyección de población del Edomex 2010-2030.....	36
Figura 3.1	Ciclo hidrológico.....	37
Figura 3.2	Distribución del agua en el suelo y subsuelo.....	44
Figura 3.3	Esquema del modelo conceptual de los procesos de la recarga	47
Figura 4.1	Esquema metodológico.....	56
Figura 4.2	Uso de suelo en el Acuífero del Valle de Toluca 1986	62
Figura 4.3	Uso de suelo en el Acuífero del Valle de Toluca 2016.....	63
Figura 4.4	Módulo Groundwater emergy, Terrset.....	64
Figura 4.5	Evidencia de trabajo en campo marzo 2017 Acuífero del Valle de Toluca.....	66
Figura 5.1	Variación temporal de temperatura y precipitación para el periodo 1984-1996.....	71
Figura 5.2	Variación temporal de temperatura y precipitación para el periodo 2010-2015.....	71
Figura 5.3	Precipitación media del periodo de lluvias en el Acuífero del Valle de Toluca 1984-1996...	73
Figura 5.4	Precipitación media del periodo de lluvias en el Acuífero del Valle de Toluca 2010-2015....	74
Figura 5.5	Temperatura media del periodo de lluvias en el Acuífero del Valle de Toluca 1984-1996.....	75
Figura 5.6	Temperatura media del periodo de lluvias en el Acuífero del Valle de Toluca 2010-2015...	76
Figura 5.7	Modelo Digital de Elevación del Acuífero del Valle de Toluca.....	77
Figura 5.8	Textura del suelo del Acuífero del Valle de Toluca.....	79
Figura 5.9	Reclasificación de uso de suelo. Año 1986.....	80

Figura 5.10	Reclasificación de uso de suelo. Año 2016.....	81
Figura 5.11	Eto promedio del periodo de lluvias 1984-1996. Acuífero del Valle de Toluca	83
Figura 5.12	Eto promedio del periodo de lluvias 2010-2015. Acuífero del Valle de Toluca	84
Figura 5.13	Escurrimiento promedio del periodo de lluvias 1984-1996. Acuífero del Valle de Toluca...	85
Figura 5.14	Escurrimiento promedio del periodo de lluvias 2010-2015. Acuífero del Valle de Toluca...	86
Figura 5.15	Infiltración potencial promedio del periodo de lluvias 1985-1996. Acuífero del Valle de Toluca	88
Figura 5.16	Infiltración potencial promedio del periodo de lluvias 2010-2015. Acuífero del Valle de Toluca	89
Figura 5.17	Ejemplo de la elaboración del hidrograma histórico del multipiezómetro 106-Almoloya del Río.....	91
Figura 5.18	Ejemplo de la elaboración del hidrograma anual (periodo 1984-1996) del multipiezómetro 106-Almoloya del Río.....	91
Figura 5.19	Ejemplo de la elaboración del hidrograma anual (periodo 1984-1996) del multipiezómetro 106-Almoloya del Río.....	92
Figura 5.20	Diagnóstico del funcionamiento de los multipiezómetros del AVT para el periodo 1970-2017.....	94
Figura 5.21	Nivel piezométrico inicial año 1984 Acuífero del Valle de Toluca.....	95
Figura 5.22	Nivel piezométrico final año 1996 Acuífero del Valle de Toluca.....	96
Figura 5.23	Nivel piezométrico inicial año 2010 Acuífero del Valle de Toluca.....	97
Figura 5.24	Nivel piezométrico final año 2015 Acuífero del Valle de Toluca.....	98
Figura 5.25	Evolución de los niveles de agua subterránea periodo 1984-1996 Acuífero del Valle de Toluca.....	101
Figura 5.26	Evolución de los niveles de agua subterránea periodo 2010-2015 Acuífero del Valle de Toluca.....	104

Índice de tablas

Tabla 2.1	Clasificación y descripción de los usos de suelo en el AVT.....	26
Tabla 2.2	Descripción del tipo de material geológico superficial en el AVT.....	30
Tabla 2.3	Datos demográficos de los municipios que conforman el AVT.....	35
Tabla 3.1	Resumen de métodos para la estimación de la recarga.....	45
Tabla 3.2	Herramientas para la interpolación en un SIG.....	51
Tabla 3.3	Coefficientes de escurrimiento.....	55
Tabla 4.1	Valores de reclasificación de textura de suelo.....	60
Tabla 5.1	Resumen de resultados del método de balance hídrico del suelo.....	70
Tabla 5.2	Resultados de infiltración potencial de ambos periodos.....	87
Tabla 5.3	Resumen de los resultados obtenidos del método de balance hídrico del acuífero.....	90
Tabla 5.4	Configuración de los niveles de agua subterránea 1984-1996.....	99
Tabla 5.5	Configuración de los niveles de agua subterránea 2010-2015.....	102
Tabla 6.1	Tabla comparativa de resultados de trabajos de recarga de agua subterránea del AVT.....	106
Tabla 6.2	Ventajas y desventajas de ambos métodos.....	109

Índice anexos

Anexo A1	Diagnóstico del funcionamiento de los multipiezómetros del AVT para el periodo 1970-2017.....	118
Anexo A2	Configuración de profundidad de nivel y evolución del periodo 1984-1996.....	121
Anexo A3	Configuración de profundidad de nivel y evolución del periodo 2010-2015.....	124

Índice ecuaciones

Ec. 1	Fórmula general del balance hídrico.....	46
Ec. 2	Fórmula del balance hídrico de suelos	48
Ec. 3	Fórmula del balance hídrico del acuífero.....	48
Ec. 4	Fórmula estimación de la ETO con el método de Thornthwaite (1948)	54
Ec. 5	Fórmula para obtener el nivel piezométrico.....	67
Ec. 6	Fórmula para estimar el balance de agua del acuífero.....	69

Acrónimos

AMC	Academia Mexicana de Ciencias
CAP-net	Capacity Development in Sustainable Water Management
CICESE	Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua
CONAGUA-CNA	Comisión Nacional del Agua
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAPO	Consejo Nacional de Población
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GWP	Global Water Partnership
IFOMEGEM	Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
SEDENA	Secretaría de la Defensa Nacional
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

UAEMex	Universidad Autónoma del Estado de México
UNAM	Universidad Autónoma de México
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

Siglas y abreviaturas

AVT	Acuífero del Valle de Toluca
CDMX	Ciudad de México
CLICOM	Climate Computing Project
DOF	Diario Oficial de la Federación
ETM	Earth Trends Modeler
SIG	Sistemas de Información Geográfica

RESUMEN

El recurso hídrico subterráneo y su comprensión han cobrado vital importancia, ya que este recurso abastece de agua a gran parte de la población mundial para sus diversas actividades. Es bajo este esquema que, conocer y estudiar todos los componentes del ciclo hidrológico es el primer paso para comprender el agua subterránea. Uno de estos componentes es la recarga de agua subterránea, es decir al precipitar el agua en forma de lluvia o nieve suceden tres procesos, el primero de ellos es que escurra a través de las montañas hasta las planicies y fluya hacia los ríos o cauces, el segundo proceso es cuando los seres vivos aprovechan parte de esa agua y el tercer proceso es que un porcentaje de agua se infiltra y alimenta los acuíferos dependiendo del tipo de suelo, la topografía y las condiciones propias del sitio. Este último proceso es el que se estudia en este proyecto, específicamente la recarga de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca.

Existen diferentes estudios donde se ha estimado la recarga de agua subterránea para el acuífero, pero los métodos son diferentes, así como la temporalidad. También, es importante tomar en cuenta que los cálculos hechos por CONAGUA en los años 1996 y 2000 difieren, pero hay que recordar que actualmente existen herramientas novedosas como la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica para la toma de decisiones en el ámbito hidrogeológico y que proporcionan resultados con mayor detalle. En este caso se han utilizado los métodos de balance hídrico del suelo y el balance hídrico del acuífero.

Cabe recalcar que uno es una estimación potencial mientras que el otro es una estimación real y para ambos métodos se consiguió información actualizada y de calidad. También este proyecto es replicable en acuíferos con condiciones meteorológicas e hidrogeológicas similares. Se obtuvieron los siguientes resultados: en el periodo comprendido entre 1984-1996, una recarga con el método hídrico del suelo de 564 Mm^3 y con el método del balance hídrico del acuífero de 407.94 Mm^3 . En el periodo 2010-2015, se obtuvo una recarga de 614 Mm^3 con el método hídrico del suelo y 441.49 Mm^3 con el método del balance hídrico del acuífero.

INTRODUCCIÓN

El agua permite a los seres vivos desarrollar sus procesos biofísicos, actividades económicas, domésticas, industriales, energéticas y alimentarias. De acuerdo con la UNESCO (2015), el 50% del agua que se consume a nivel mundial y el 43% del agua utilizada para riego tiene su origen en aguas subterráneas. Aproximadamente, 2,500 millones de personas dependen de los recursos hídricos subterráneos para satisfacer sus requerimientos diarios. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2016) menciona que el volumen estimado de agua subterránea global es de 10.53 millones de km³, pero sólo el 0.03% del almacenamiento mundial de agua subterránea se compone de recargas anuales.

La extracción de este recurso en el mundo se incrementó más del 300% en el periodo de 1960 a 2010. A nivel mundial, los acuíferos han experimentado una creciente amenaza, tanto en su cantidad como en su calidad, causada por las actividades antropogénicas como la urbanización desordenada, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y mineras (Foster *et al.*, 2002). En México, los antecedentes de esta situación se remontan a unos pocos años después de que inició la explotación de aguas subterráneas mediante pozos profundos, a partir de la década de 1930, para abastecer las crecientes necesidades de agua de la Ciudad de México, y en los años 40 para apoyar el desarrollo agrícola en las zonas áridas del norte (AMC, 2010). De acuerdo con CONAGUA-SEMARNAT (2016), de los 653 acuíferos del país, para el año 2015 existían 105 acuíferos sobreexplotados (en función de la relación extracción/recarga). Para poder gestionar adecuadamente los recursos hídricos subterráneos es necesario conocer el ciclo del agua y uno de sus componentes es la recarga.

La recarga es la entrada natural o artificial de agua a la zona saturada de un acuífero (UNESCO, 2012). A pesar de que la cuantificación de la recarga es esencial para la gestión de los recursos hídricos, también es uno de los componentes menos comprendidos debido a que las tasas de recarga varían en el espacio y el tiempo, lo que complica su medición de forma directa (Healy, 2010). En el marco de la gestión de los recursos hídricos

subterráneos, estimar adecuadamente la recarga es un punto clave para proponer un esquema sustentable para el manejo de un acuífero. En este sentido, el presente trabajo justifica estimar la recarga de agua subterránea mediante diferentes métodos para evaluar los resultados y de esta manera saber si los métodos se complementan entre sí. A continuación, se presenta una breve descripción del contenido de esta tesis:

El Capítulo I “Generalidades” trata sobre el panorama general de la estimación de la recarga a nivel internacional, nacional y local, así como la influencia de la variabilidad climática para la estimación de la recarga. Así mismo, se da la justificación contextual y científica, la hipótesis y los objetivos del presente proyecto.

El Capítulo II “Descripción de la zona de estudio”, es la revisión general de las características físicas y socioeconómicas del Acuífero del Valle de Toluca e incluye: ubicación, topografía, clima, precipitación, edafología, uso de suelo y vegetación, geología hidrología, hidrogeología, y finalmente, las características socioeconómicas.

El Capítulo III “Marco teórico-conceptual” es la descripción de los conceptos teóricos de los métodos utilizados en el presente proyecto. También describe aquellas herramientas tecnológicas como los SIG, que coadyuvan a estimar la recarga de agua subterránea.

En el Capítulo IV “Metodología” se presenta el proceso metodológico a partir de un esquema que describe cada paso a seguir para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el Capítulo I “Generalidades”

Posteriormente En el Capítulo V, “Exposición y análisis de los resultados”, se exponen los resultados y el análisis a detalle generado de los mismos.

Finalmente, en el Capítulo VI, “Discusión, conclusiones y recomendaciones” se ahonda la discusión sobre resultados de trabajos previos, las ventajas y las desventajas que representó la aplicación de los métodos de balance hídrico del suelo y balance hidrológico del acuífero, y se presentan las conclusiones obtenidas así como una serie de recomendaciones.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 Importancia de la adecuada estimación de la recarga de agua subterránea en el entorno de la GIRH

De acuerdo con CAP-net (2010), la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un enfoque que promueve el desarrollo y la gestión coordinada de agua, suelos y demás recursos asociados con el objeto de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales.

El agua subterránea es el agua que ocupa la zona saturada del subsuelo y que se filtra en los intersticios y formaciones geológicas permeables (UNESCO, 2012) y su problemática se circunscribe a dos grandes aspectos:

1. Calidad (contaminación)
2. Cantidad (sobreexplotación)

Según CAP-net (2010), las aguas subterráneas y las aguas superficiales están estrechamente interconectadas y, desde un enfoque de GIRH, ambas deberían gestionarse como un solo recurso. La gestión de las aguas subterráneas tiene como principal objetivo el desarrollo sostenible del recurso para diferentes usos. Un asunto clave para la sostenibilidad de las aguas subterráneas es el equilibrio entre los recursos disponibles y las crecientes demandas de agua. Los principales objetivos de la adecuada gestión del recurso hídrico subterráneo son: equilibrar la recarga de las aguas subterráneas y la extracción y proteger las aguas subterráneas de la contaminación.

Por lo que es necesario estimar y actualizar adecuadamente la recarga, lo que permitirá dotar a los tomadores de decisiones de información más confiable para la gestión de los recursos hídricos subterráneos y existen varios estudios en la zona de estudio donde se han empleado diferentes métodos para lograr este objetivo.

1.2 Casos de estudio de la recarga y la variabilidad climática en el Acuífero del Valle de Toluca

En el Acuífero del Valle de Toluca (AVT) hay varios trabajos académicos y técnicos relacionados con el tema de la recarga, por ejemplo:

Calderhead (2009) obtuvo la recarga para el periodo comprendido entre 1960-2050, resultando en promedio 376 Mm^3 año (para el año 2000) y una proyección para el año 2050 promedio de 361 Mm^3 año. La recarga se determinó con los datos históricos del clima (periodo 1970-2050). La predicción de cambio climático, los escenarios utilizados con el método HELP 3 (The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) y de bombeo, muestran una disminución en la recarga y el aumento de bombeo de agua en los próximos 50 años. Este déficit aumentará un promedio de 292 Mm^3 año o un máximo de 456 Mm^3 por año en 2050.

Ortiz (2010) obtuvo la recarga por precipitación para el periodo 1993-2008. En el análisis se incluyeron los factores topográficos, climatológicos y tipo y uso de suelo, evaluando además la contribución de origen antrópico y de los cuerpos de agua. En cuanto al resultado, se observó que los valores más altos de percolación se encuentran en la parte central rodeando a la zona urbana, así como en las partes altas, debido al efecto de las variables consideradas.

Así mismo, se calculó la recarga potencial total del acuífero, considerando la recarga localizada y constante (debido al efecto de los cuerpos de agua y las fugas en las redes de abastecimiento público), así como la recarga por precipitación, obteniéndose una lámina de recarga de 140 mm/año que acontece en la parte central del valle y en las montañas mientras que los valores puntuales que se identificaron en donde había poblaciones cercanas, son debidos a las fugas en el sistema de distribución de agua. Permitted establecer que el 16% de la recarga es localizada y constante mientras que el 84% es debida a las precipitaciones. Cabe destacar que, en los meses de estiaje, la principal aportación proviene de la recarga puntual.

Salas (2012), planteó como objetivo primordial mejorar el entendimiento de la distribución espacial y temporal de la recarga potencial en un acuífero (específicamente del Acuífero del Valle de Toluca). Los resultados fueron que la recarga ocurre, en orden descendente de magnitud, en la Sierra de Monte Alto, el Nevado de Toluca y en la Sierra de las Cruces.

Además, los valores menores de recarga tienen lugar en el valle. De acuerdo con el resultado, esa zona indicaba menor evapotranspiración debido a la ausencia de vegetación (lo cual es correcto), sin embargo, en el cálculo de la escurrimiento, se asumía que esa era una zona agrícola cuando en realidad, eran asentamientos humanos, lo cual, de acuerdo con el autor, sobreestimó el valor de la recarga local. El empleo del parámetro de la distribución de los pozos sirvió para rectificar la información que se obtuvo. También se identificó que la mayor concentración de pozos del Sistema Lerma coincidió con las zonas de recarga al oeste del valle. El principal resultado que se obtuvo es que la recarga ocurría en la periferia de la cuenca.

En el tema de variabilidad climática: Ordoñez (2015) analizó el cambio y la pérdida de estacionalidad de variables climáticas dentro de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago para un periodo de 51 años y a nivel mensual (1960-2010). Mediante el uso del Modelador de Tendencias de la Tierra (ETM – Earth Trends Modeler) del SIG Idrisi Selva, se exploraron las series de precipitación y de temperatura máxima y mínima y se utilizaron métodos de análisis de tendencia como Mann-Kendall y desfase estacional. Se observó un acortamiento en la temporada de lluvias debido a que, en los últimos 25 años, las precipitaciones se desfasaron (retrasaron) por una diferencia de entre 2 y 11 días y el incremento de la temperatura media y la temperatura máxima mostró un comportamiento más extremo para los últimos 25 años así como una pérdida de estacionalidad.

Esta investigación tiene diversas aplicaciones, por ejemplo, tal como lo hizo el autor, asociando los resultados con las coberturas del cultivo temporal del maíz para identificar la relación de la variabilidad climática con los requerimientos hídricos y térmicos de la plantación. Finalmente, es posible su aplicación para conocer la relación entre la climatología y los niveles de agua subterránea.

1.3 Justificación contextual y científica

De acuerdo con CONAPO (2017) se estima que para el año 2030, la población del Estado de México se aproximará a los 20,167,433 habitantes y la demanda del recurso hídrico subterráneo se incrementará considerablemente. Según CONAGUA-SEMARNAT (2016), actualmente, el Acuífero 1501, Valle de Toluca pertenece a los 105 acuíferos en condición de sobreexplotación. Los principales usos del agua subterránea son: abastecimiento público-urbano, agrícola, industrial y otros (servicios y recreativos). Además, el AVT es el segundo acuífero más complejo a nivel nacional, debido al abastecimiento de agua potable para la CDMX y sus cualidades y dinámica hidrológica presenta un descenso promedio anual del nivel piezométrico de 1.5 metros (CONAGUA, 2015).

Es necesario conocer la recarga del agua subterránea del Acuífero del Valle de Toluca, su hidrodinámica, la fluctuación de sus niveles y su relación con el clima para poder gestionar adecuadamente los recursos hídricos. Es importante resaltar que se cuenta con información actualizada de la climatología y de la piezometría (ambos factores tienen datos desde 1960) lo que permitirá realizar un análisis más adecuado sobre la recarga, reduciendo así la incertidumbre debida a la temporalidad.

Este conocimiento permitirá saber cómo reacciona el acuífero a los eventos climáticos (precipitación) y puede aportar nueva información para el proceso de gestión y toma de decisiones sobre el recurso, al dotar de información más confiable y actualizada a los gestores. Desde el punto de vista científico, resulta conveniente que los pasos metodológicos puedan aplicarse a otros acuíferos con características semejantes. Los mayores beneficiados serán los habitantes de la región al poder satisfacer sus requerimientos de este valioso recurso.

1.4 Hipótesis

El empleo de métodos del balance hídrico, partiendo del análisis de los datos climatológicos y piezométricos para una amplia temporalidad (desde 1960 hasta 2015), mediante el uso de herramientas como los SIG, permitirá estimar la recarga de agua

subterránea del Acuífero del Valle de Toluca de manera espacial y temporal con mayor detalle.

1.5 Objetivos

Los objetivos de este estudio son:

1.5.1 Objetivo general

Estimar de forma espacio-temporal la recarga de agua subterránea mediante métodos de balance hídrico en el Acuífero del Valle de Toluca para actualizar la información disponible.

1.5.2 Objetivos específicos

- Recopilar, analizar y geoprocesar la información disponible relacionada con el área de estudio para conformar la base de geodatos.
- Estimar la recarga de agua subterránea mediante el método de balance hídrico del suelo para obtener la recarga potencial
- Estimar la recarga de agua subterránea mediante el método de balance hídrico del acuífero para obtener la recarga real
- Identificar y analizar las ventajas y desventajas de las dos variantes del método de balance hídrico (balance hídrico del suelo y balance hídrico del acuífero) y su aplicación en la estimación de la recarga del Acuífero del Valle de Toluca para mejorar la toma de datos y la actualización de la información disponible.

CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el presente capítulo se describen las características físico-geográficas y socioeconómicas del Acuífero del Valle de Toluca.

2.1 Características generales del Acuífero del Valle de Toluca

El Acuífero del Valle de Toluca (Figura 2.1), se ubica al sur del Altiplano Mexicano y limita al Norte con el Acuífero de Atlacomulco- Ixtlahuaca, al Sur con el cerro de Tenango, al Sur-Poniente con el Volcán Nevado de Toluca y al Oriente con la Sierra de las Cruces y Monte Alto respectivamente, cubriendo un área total aproximada de 2,738 km². Forma un extenso valle con elevaciones que oscilan entre los 2600 msnm y los 4680 msnm, siendo la máxima altitud el Nevado de Toluca.

Los municipios comprendidos total o parcialmente dentro del límite del AVT son: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Xalatlaco, Jilotcingo, Jiquipilco, Joquicingo, Ixtlahuaca, Lerma, Metepec, Mexicalcingo, Naucalpan de Juárez, Nicolás Romero, Ocoyoacac, Oztolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Villa Victoria, Xonacatlán y Zinacantepec (INEGI, 2016). En la Figura 2.1, se muestran los AGEB, los cuales son la extensión territorial que corresponde a la subdivisión de las áreas geo estadísticas municipales y se dividen en urbanas y rurales.

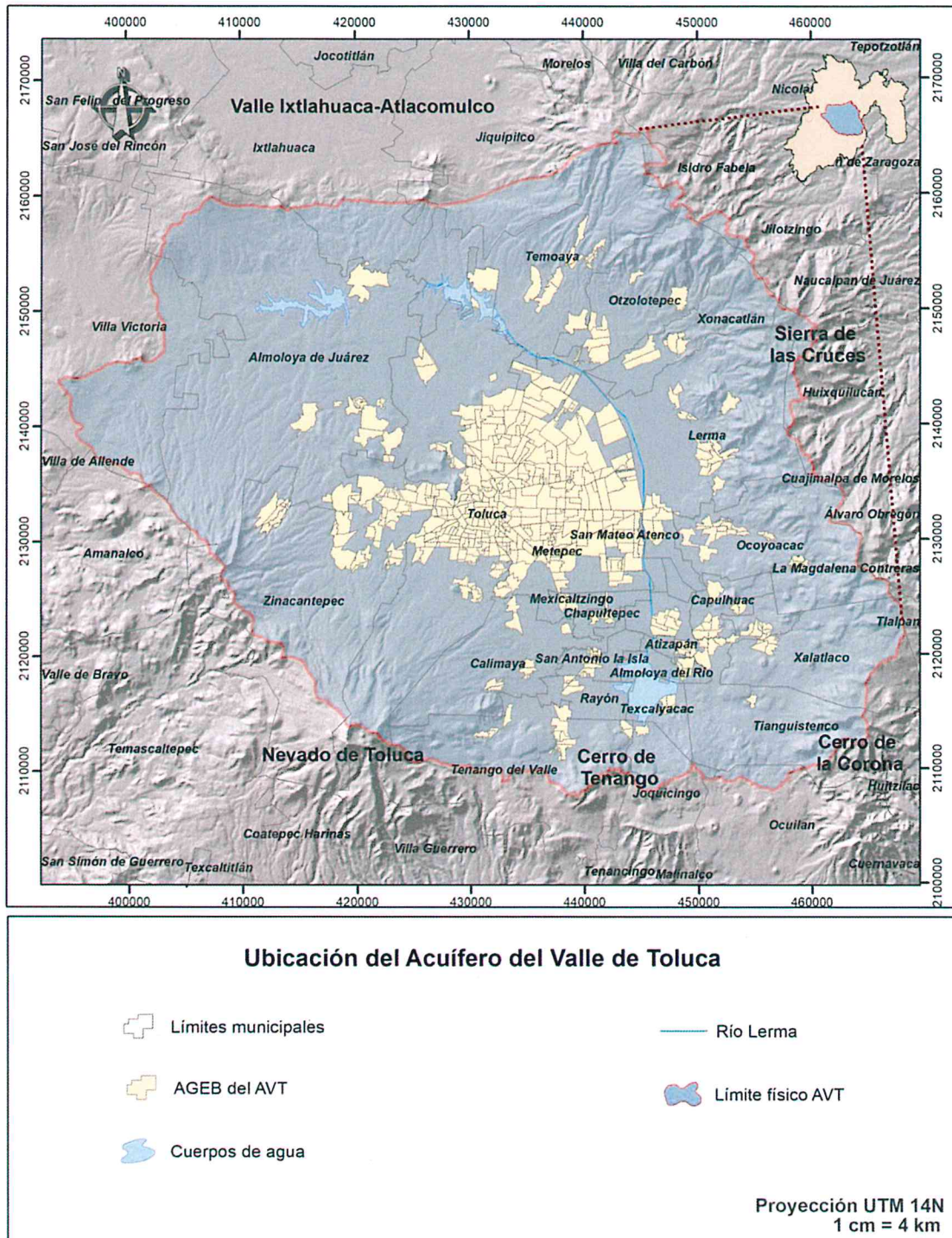


Figura 2.1 Ubicación del Acuífero del Valle de Toluca (INEGI, 2016)

2.2 Edafología, clima y precipitación

Según datos vectoriales de INEGI (2014), los tipos de suelo que conforman el AVT son los que se muestran a continuación en la Figura 2.2. Los tipos de suelo que conforman el AVT, son principalmente: Phaeozem, Andosol, Vertisol y en menor proporción se observa: Regosol, Cambisol, Leptosol, Fluvisol, Histosol y Acrisol.

El clima en el Acuífero del Valle de Toluca (Figura 2.3), de acuerdo con la clasificación del clima de Köppen modificado por Enriqueta García (1981), corresponde a templado subhúmedo con lluvias en verano, tipo Ganges y un porcentaje de precipitación invernal menor al 5%. En la Sierra de las Cruces y Monte Alto corresponde a clima semifrío subhúmedo y en el Nevado de Toluca el clima es frío de altura. La temperatura media anual en el Valle de Toluca oscila entre los 12°C y 13°C; en los meses de diciembre y enero la temperatura media es aproximadamente de 9.5°C e incrementa hasta el mes de mayo donde alcanza los 14°C. La curva de temperatura mensual en todas las estaciones del acuífero muestra el mínimo en la última semana de enero y su valor promedio corresponde a 5.9°C.

La precipitación media anual oscila entre los 800 y 1000 mm mensuales (Figura 2.4). La estación de Toluca, ubicada en la coordenadas geográficas Latitud Norte: 19° 16' 41.1'' y Longitud Oeste: 99° 39' 23.1'', registra 785 mm/año con valores extremos de 1,183 y 776.4 mm/año. En las partes altas se presentan valores entre 1,200 mm y 1,400 mm anuales, por ejemplo, en el Nevado de Toluca, donde la precipitación se incrementa hasta 1,200 mm anuales. Además, se presenta un descenso hacia la porción noroccidental. La temporada de lluvias es de mayo a octubre siendo los meses de junio a septiembre los que presentan los valores más altos con 140 mm mensuales. El estiaje se presenta en los meses de noviembre y abril con valores de 12 mm/año en promedio (CONAGUA, 2002).

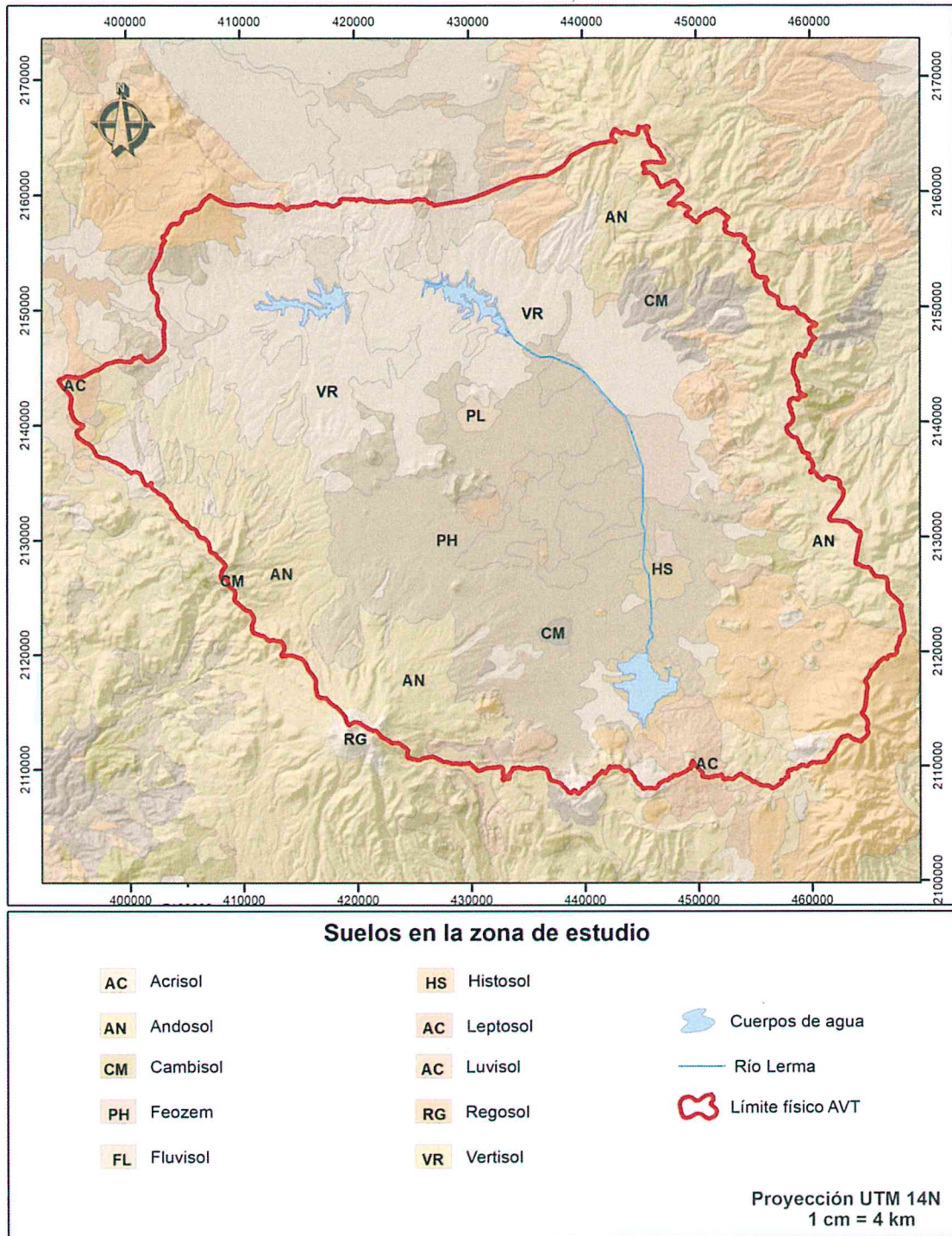


Figura 2.2 Suelos de la zona de estudio. INEGI (2014)

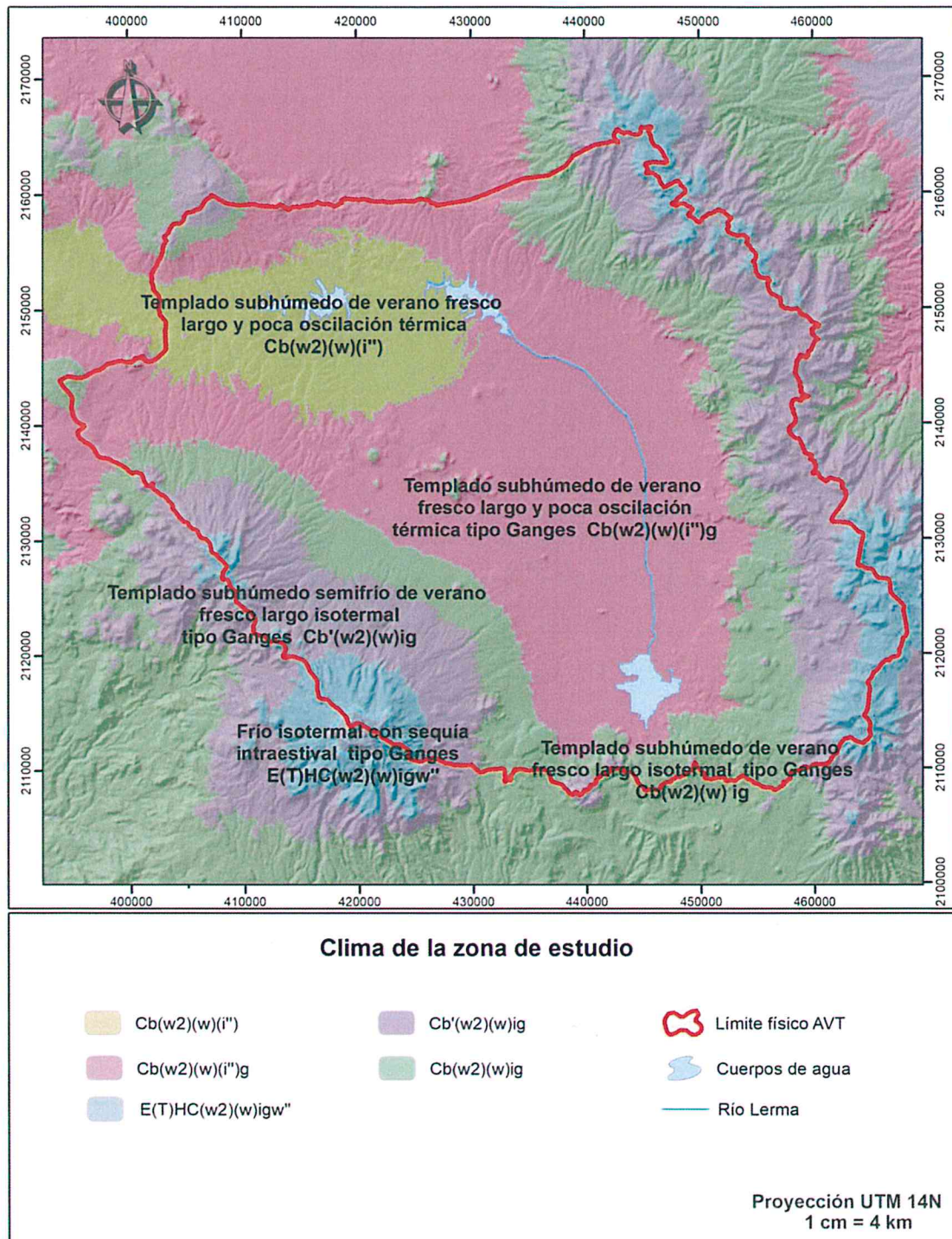


Figura 2.3 Clima de la zona de estudio Gómez Albores, et al (2015)

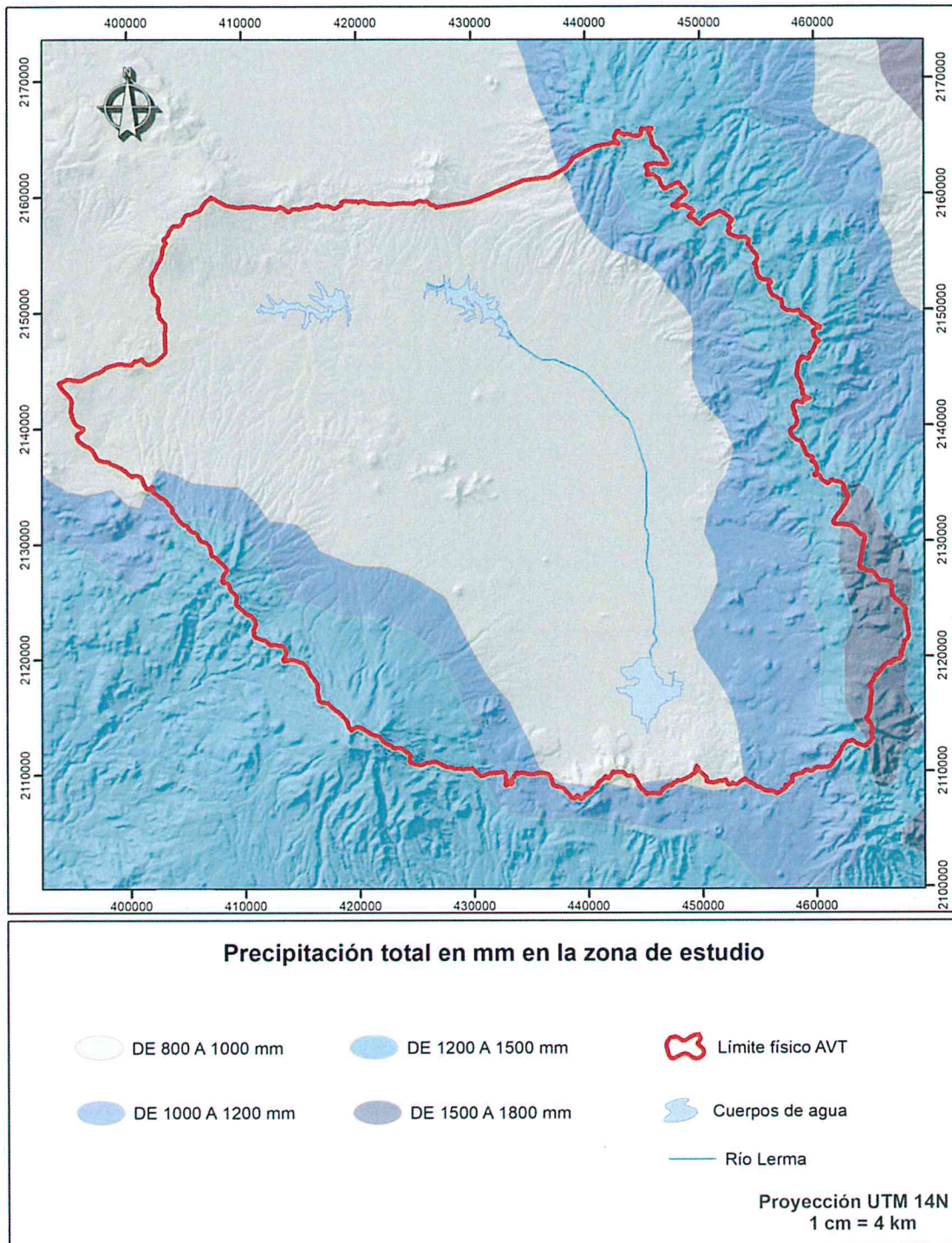


Figura 2.4 Precipitación total (mm/año) de la zona de estudio CONABIO (1998)

2.3 Vegetación y uso de suelo

De acuerdo con SEDENA (2015), la mayor extensión del territorio de la zona de estudio es de uso agrícola (Figura 2.5), seguido por el uso para asentamientos humanos, bosques, pastizales, zonas sujetas a inundación y áreas sin vegetación. Los bosques que predominan en la región son principalmente templados de coníferas, de pino, abeto u oyamel, ayarín, cedro, táscate, y encino, así como bosques mixtos de pino y encino los cuales se desarrollan en temperaturas promedio de los 12°C a los 13°C. Son considerados ecosistemas subhúmedos a templados húmedos con precipitaciones que oscilan entre los 600 y los 1000 mm, éstos crecen en suelos variados, pero generalmente ricos en materia orgánica. El principal impacto ha sido la tala de grandes extensiones para el desarrollo de la agricultura, industria maderera, obtención del ocote, el pastoreo extensivo. También hay que considerar otros impactos como los incendios forestales, y el cambio climático. Los principales usos de suelo y vegetación en el AVT se agrupan por clases detalladas en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Clasificación y descripción de los usos de suelo en el AVT

Clase	Descripción	Ubicación en el AVT
Agricultura	Agricultura de temporal Agricultura de riego	En el centro del AVT y periferias de la zona urbana
Poblado	Zonas urbanas	Comprende la ZMVT y localidades aledañas
Bosques	Bosque de encino Bosque de pino-encino Selva baja caducifolia	Al Este en la Sierra de las Cruces, al SE en el Cerro de la Corona y en el Nevado
Cuerpos de agua	Cuerpos de agua Vegetación acuática	
Pastizal	Comunidades herbáceas en las que predominan las especies de gramíneas o gramínoideas determinadas por condiciones naturales de clima y suelo.	Principalmente al Norte y NE. Al pie de monte de la Sierra de las Cruces
Chaparral-Matorral	Asociación de arbustos o árboles esclerófilos de 1 a 4 m de alto. Se encuentra en las llanuras, valles y lomeríos, entremezclado ocasionalmente con otros tipos de vegetación	Al N, en la transición del paisaje de pradera a uno de bosque en colindancia con el Valle Atlacomulco-Ixtlahuaca
Claro (suelo desnudo)	Sombras , Nubes , Incendios , Humo , Colada de lava	En el Nevado de Toluca, al SE de la zona urbana

Fuente: SEDENA (2015)

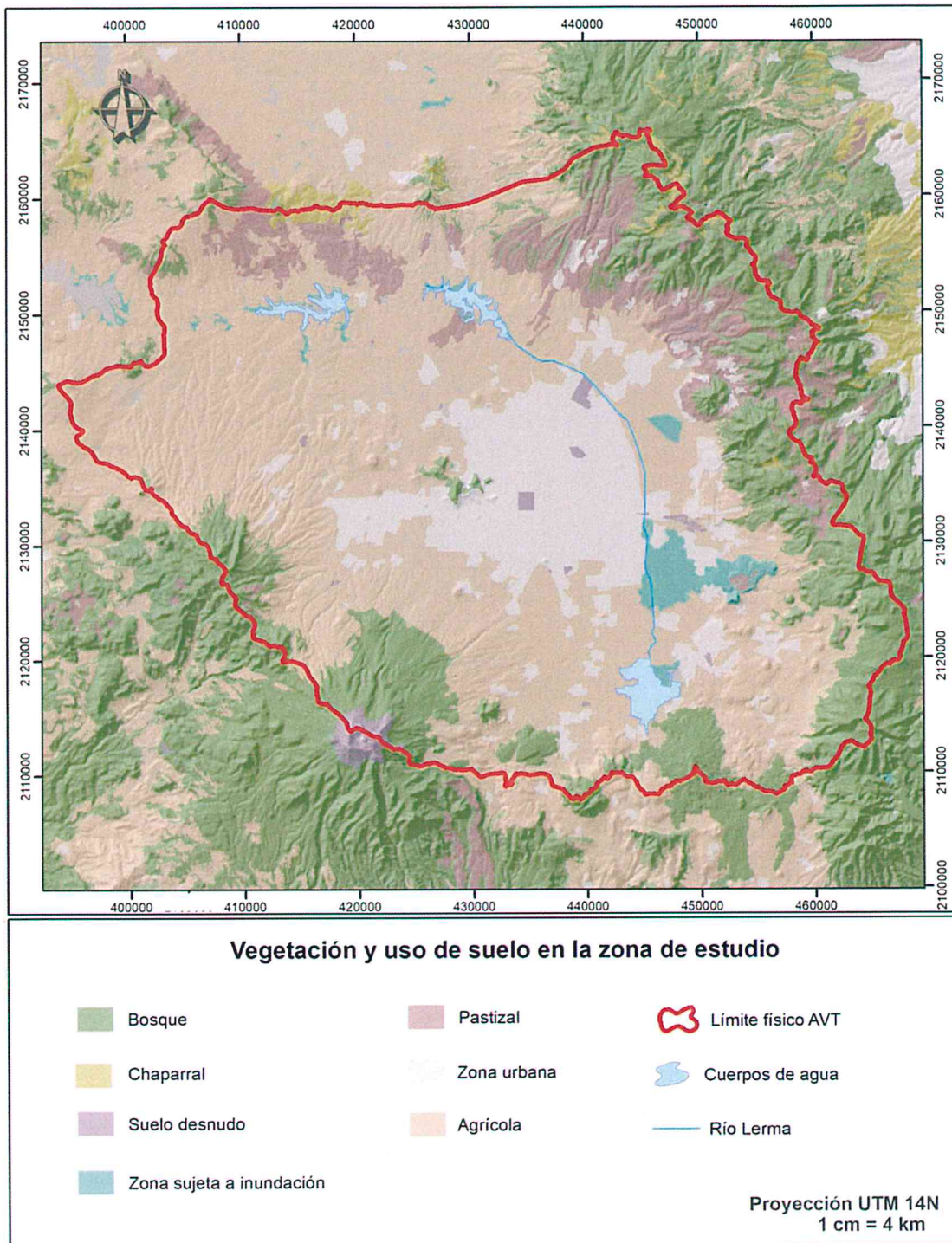


Figura 2.5 Vegetación y uso de suelo de la zona de estudio SEDENA (2015)

2.4 Hidrología

La zona de estudio queda comprendida en la Región Hidrológica No.12 en la cuenca del Río Lerma (Figura 2.6) y forma parte de la Cuenca Alta del Río Lerma. En el área de estudio se encuentran seis subcuencas específicas que son: la Laguna de Almoloya de Río, Laguna de Tultepec, Laguna de San Bartolo, afluentes del Río Lerma, Río Tejalpa y afluentes de la presa José Antonio Alzate (CONAGUA, 2009). El escurrimiento superficial más importante es el Río Lerma, el cual es de tipo perenne cuyo cauce sigue una dirección hacia el norte, atravesando el Valle de Ixtlahuaca hasta Atlacomulco. En la cuenca se localizan las lagunas de Almoloya del Río, San Bartolo y Lerma. En la actualidad solo la primera de ellas funciona como almacenamiento natural. El Río Lerma recorre una longitud de 178.60 km a partir de su nacimiento hasta la Presa Alzate.

Del volcán Nevado de Toluca, desciende el río Ojo de Agua con dirección oriente hacia San Antonio la Isla, desembocando en la laguna de Almoloya del Río en donde se concentran escurrimientos que tienen origen en la Sierra de las Cruces. Del Nevado de Toluca también descienden de forma radial los ríos Verdiguél (que atraviesa Toluca y descarga en el Río Lerma) y el Río Tejalpa. Otros ríos y arroyos provienen de la vertiente occidental de las Serranías y de la porción oriental provenientes de la Sierra de Monte Alto y las Cruces (con prolongación hacia el norte, descienden los ríos Ocoyoacac, Mayorazgo, Oztolotepec y el arroyo de Temoaya) (CONAGUA, 2002).

La zona lacustre está conformada por lagunas y manantiales de Almoloya del Río, Lerma y San Bartolo, sin embargo, debido a la excesiva extracción, los niveles han descendido. El cauce del Río Lerma recibe el aporte de aguas residuales de Toluca y de poblaciones aledañas y del corredor industrial Toluca-Lerma representando así, la cuenca más contaminada del país, en el tramo Toluca-Atlacomulco (CONAGUA, 2002). El principal uso de las presas José Antonio Alzate e Ignacio Ramírez, es el control de avenidas y el almacenamiento para riego.

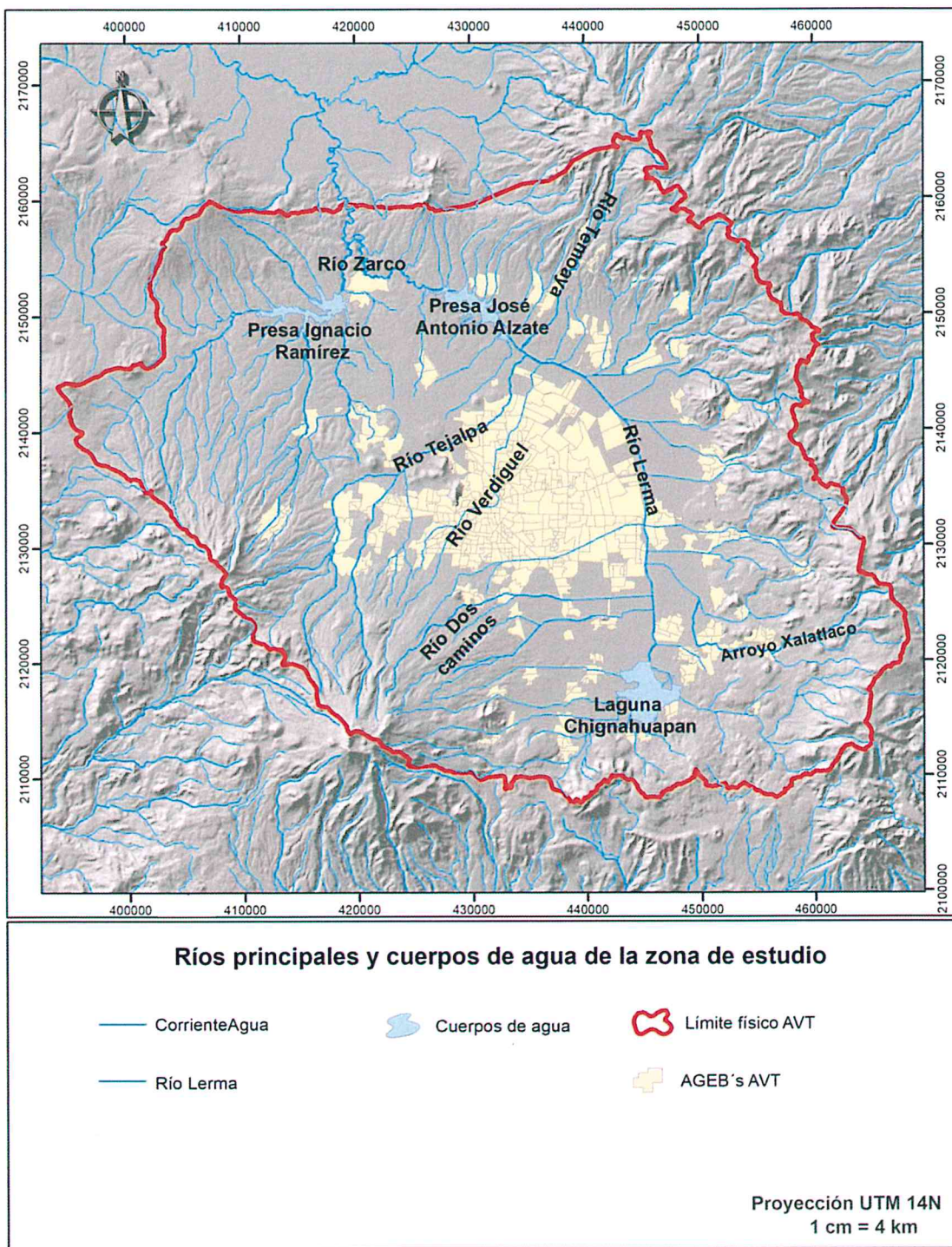


Figura 2. 6 Ríos principales y cuerpos de agua de la zona de estudio CONAGUA (2009)

2.5 Geología

El relieve que constituye el AVT (Figura 2.7) se caracteriza por estar formado de material volcánico, al estar ubicado dentro del Eje Neovolcánico, lo que implica actividad volcánica reciente (Terciario Medio - 26 millones de años). Está constituido en sus partes altas por basaltos y andesitas y por materiales piroclásticos en los bordes de las sierras e incluyen tobas, aglomerados, brechas, cenizas volcánicas, conos cineríticos, derrames lávicos y lahares (CONAGUA, 2002). Las sierras orientales que limitan al AVT, están formadas por rocas andesíticas del Terciario Superior afectadas por procesos como intemperismo y erosión que han formado suelos residuales al pie de sus taludes como es el caso de las Sierras Monte Alto, Las Cruces, Apisco y Catedral (CONAGUA, 2008). Las planicies, como el Valle de Toluca, están formadas por materiales lacustres, producto de los lagos asentados en la cuenca, así como por depósitos aluviales interdigitados con materiales piroclásticos. La descripción del material se detalla a continuación en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Descripción del tipo de material geológico superficial en el AVT

Clave	Descripción
Qal	Aluvión. Grava, arena y limo con interestificación de ceniza volcánica
Qla	Sedimentos lacustres con interestificación de ceniza
Qhv	Derrames de lava de composición basáltica y andesítica con depósitos cineríticos y rocas piroclásticas
Qpla	Sedimentos lacustres. Conglomerado, arenisca y limolita semi-consolidados con capas de toba, pómez y diatomita
Qpv	Derrames de lava, basalto y andesita, aglomerado y brecha de derrames asociados
Qpvc	Lahar y depósitos volcánicos clásticos, menor cantidad de depósitos fluviales interestificados
Tpvc	Rocas volcánicas epiclásticas, abanicos aluviales, depósitos laháricos y ceniza volcánica
Tpv	Basalto y andesita
Tmv	Lavas basálticas y andesíticas
Tmpv	Derrames de lava andesítico- basáltico. Tobas volcánicas indiferenciadas, principalmente andesíticas

Fuente: IFOMEGEM (1994)

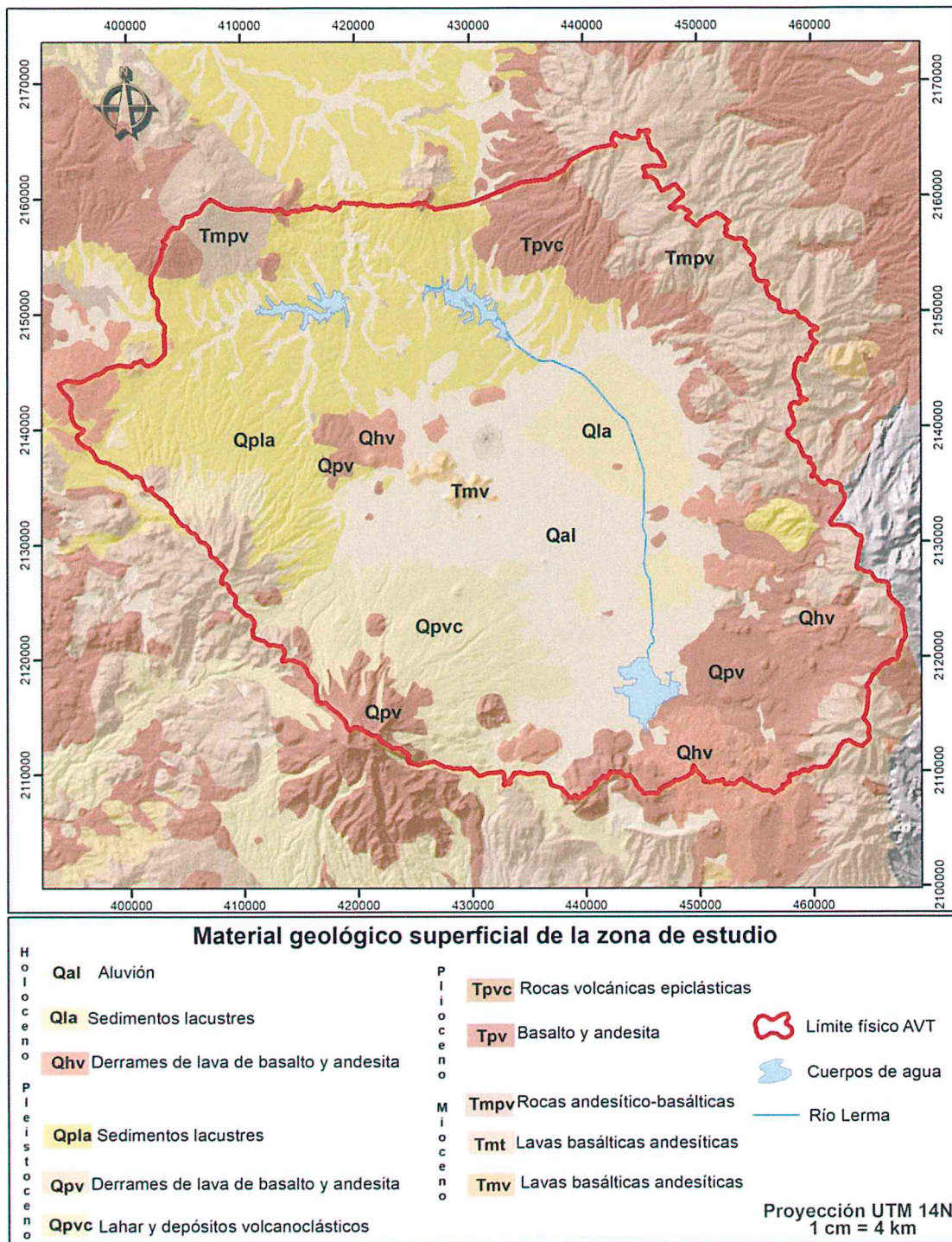


Figura.2. 7 Material geológico superficial de la zona de estudio IFOMEGEM (1994)

2.6 Hidrogeología

El Acuífero del Valle de Toluca tiene un buen potencial de aguas subterráneas, el cual ha sido mermado por la exportación de grandes volúmenes de agua mediante la batería de pozos del sistema Lerma para la Ciudad de México y la extracción para su uso local, presentando un abatimiento de los niveles piezométricos y formación de grietas en el terreno (CONAGUA, 2009). De acuerdo con Expósito (2012), el AVT está conformado por dos tipos de medios geológicos: el medio poroso y el medio fracturado. El medio poroso está formado por depósitos de clásticos no consolidados que rellenan la cuenca del Valle de Toluca, su permeabilidad, está en función de la granulometría de sus granos. Este medio está representado por las siguientes unidades estratigráficas: tobas y arenas, depósitos aluviales (Qal), lacustres (Qla) y la formación Tarango (Tmpv). También, otras unidades estratigráficas que constituyen el medio poroso son los flujos del Nevado de Toluca y conos volcánicos recientes. El medio fracturado está conformado por andesitas (Tpv), y basaltos antiguos (Qpv) (Figura 2.8).

De esta manera, atendiendo las propiedades de porosidad y fracturamiento de las unidades litológicas, el sistema acuífero regional queda integrado por el acuífero superior con medio poroso y el inferior con medio fracturado. El primero funciona como acuífero libre y el segundo como semi-confinado. Ambas capas, a pesar de estar divididas por materiales impermeables, se consideran como parte de un mismo acuífero (Ortiz, 2010). Los flujos del Nevado de Toluca y los derrames de lava funcionan como zonas de recarga ya que propician la infiltración de la precipitación y de los escurrimientos superficiales debido a su nivel topográfico que usualmente se encuentra por encima del nivel de saturación.

El AVT se caracteriza por tres direcciones principales de flujo: el primero proviene de la Sierra de las Cruces con circulación Oeste-Pie de la Sierra, el segundo proviene del Nevado de Toluca con dirección Norte con salida en Ixtlahuaca, y el tercero proviene de las infiltraciones del Nevado con dirección Este-Noreste (Expósito, 2012).

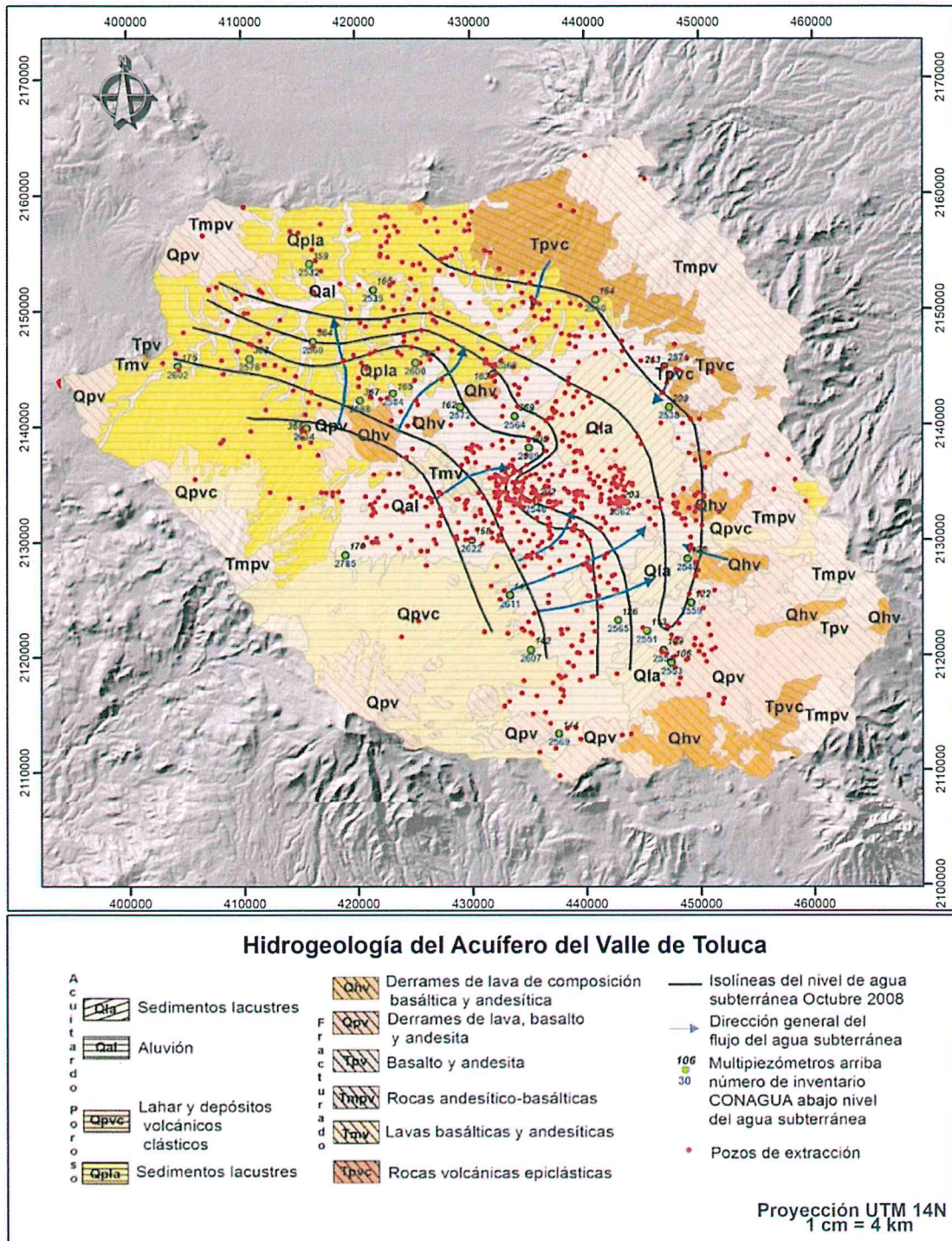


Figura 2. 8 Hidrogeología en el Acuífero del Valle de Toluca . Expósito (2012)

2.7 Usos del agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca

De acuerdo con datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA, 2017) los principales usos del agua en el AVT corresponden a:

1. Público urbano (68%)
2. Industrial (19%)
3. Agropecuario (12%)
4. Otros (1%)

2.8 Características socioeconómicas

A continuación, se describen las características socioeconómicas en los municipios que conforman el Acuífero del Valle de Toluca.

2.8.1 Demografía

Según COESPO (2017) la Región del Valle de Toluca está integrada por 29 municipios de carácter metropolitano que son: Toluca, Metepec, Lerma, San Mateo Atenco, Ocoyoacac, Xonacatlán, Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Temoaya, Tenango del Valle, Santiago Tianguistenco, Jalatlaco, Almoloya del Río, Santa Cruz Atizapán, Capulhuac, Calimaya, Chapultepec, Mexicaltzingo, Oztolotepec, Santa María Rayón, San Antonio la Isla y Texcalyacac.

Estos municipios ocupan una superficie de 2,669 km² en su totalidad, correspondiendo 1,820 km² a los municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y 849 km² a la periferia metropolitana. La zona de estudio queda comprendida en esta región. La población está distribuida de la siguiente manera: 87% se localiza en áreas urbanas y 13% en áreas rurales (INEGI, 2014). La tabla 2.3, muestra la información demográfica de los municipios que se sitúan dentro de la zona de interés.

Tabla 2.3 Datos demográficos de los municipios que conforman el AVT

ID	Municipio	Densidad de población hab/km ²	Población total año 2017
1	Almoloya de Juárez	373	176,237
2	Almoloya del Río	1,177	11,126
3	Atizapán	1,417	11,875
4	Calimaya	549	565,74
5	Capulhuac	1,655	35,495
6	Chapultepec	1,035	11,764
7	Xalatlaco	269	29,572
8	Jilotcingo	164	19,013
9	Jiquipilco	269	74 314
10	Joquicingo	309	13 857
11	Ixtlahuaca	460	153 184
12	Lerma	639	146 654
13	Metepec	3 391	227 827
14	Mexicalcingo	1 096	12 796
15	Naucalpan de Juárez	5 380	844 219
16	Nicolás Romero	1 779	410 118
17	Ocoyoacac	481	66 190
18	Otzolotepec	655	84 519
19	Rayón	579	13 261
20	San Antonio la Isla	1 183	27 230
21	San Mateo Atenco	3 582	75 511
22	Temoaya	548	103 834
23	Tenango del Valle	417	86 380
24	Texcalyacac	207	5 246
25	Tianguistenco	588	77 147
26	Toluca	2 053	873 536
27	Villa Victoria	248	104 612
28	Xonacatlán	1 564	51 646
29	Zinacantepec	608	188 927
TOTAL			3,992,664

Fuente: Estadística Básica Municipal. IGECEM (2016)

De acuerdo con CONAPO (2014), se proyecta que la población del Estado de México, para el año 2030 se acerque a los 20, 000 000 habitantes (Figura 2.9) por lo cual la demanda del recurso hídrico subterráneo se incrementará considerablemente.

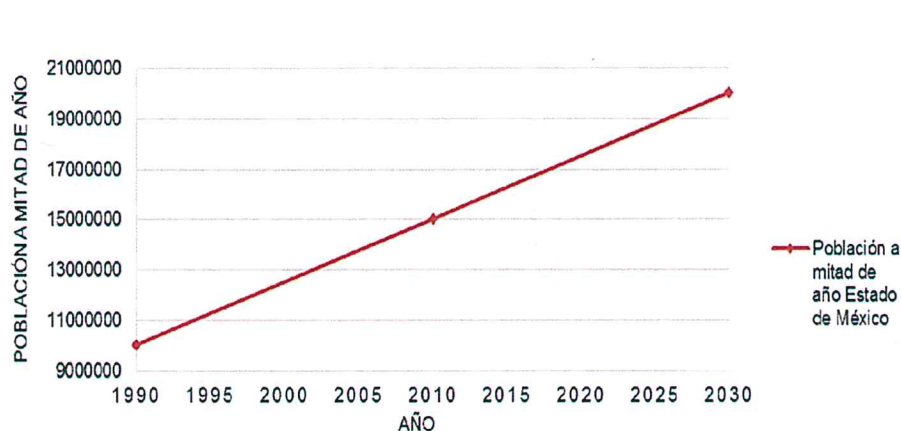


Figura 2.9 Proyección de población del EDOMEX 2010-2030. Tomado de CONAPO, Dirección General de Estudios Sociodemográficos y Prospectiva (2014)

2.8.2 Economía

De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Económico del Estado de México (2014), la densidad de población en el Estado de México corresponde a 724 habitantes por km². La aportación del Estado de México al PIB nacional corresponde a 9.3% y los resultados del Censo Económico 2014 de INEGI, muestran que, a nivel estatal, el principal sector de actividades económicas es el terciario ya que aporta el 66% del PIB estatal, seguido de las actividades secundarias con el 32% y, finalmente, las actividades primarias que aportan el 2%.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

3.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico (Figura 3.1), también denominado ciclo del agua se puede describir según NOAA (2017) con base en nueve procesos físicos principales: evaporación, condensación, precipitación, interceptación, infiltración, percolación, transpiración, escorrentía y almacenamiento. Estos procesos físicos forman un continuo movimiento del agua y una característica fundamental del ciclo hidrológico es que no tiene comienzo y no tiene fin. Para estimar la recarga se hace especial énfasis en el proceso de percolación e infiltración.



Figura 3.1 Ciclo hidrológico. Tomado de USGS (2014)

3.1.1 Percolación

Es el movimiento del agua a través del suelo, y de sus capas, por la gravedad y las fuerzas capilares. La principal fuerza motriz del agua subterránea es la gravedad. La zona de aireación (donde existe el aire) se llama zona vadosa. Esencialmente, todas las aguas subterráneas están en movimiento. Sin embargo, parte de ella se mueve muy lentamente. El

movimiento del agua se genera debido a los vacíos o poros en las formaciones geológicas. Algunas formaciones conducen el agua de regreso a la superficie del suelo (NOAA, 2017). De acuerdo con UNESCO (2012) percolación se refiere al flujo de un líquido a través de un medio poroso no saturado, por ejemplo, el flujo de agua en el suelo por acción de la gravedad.

3.1.2 Infiltración

La infiltración es el proceso físico que implica el movimiento del agua a través de la zona límite donde la atmósfera interfiere con el suelo. El fenómeno superficial se rige por las condiciones de la superficie del suelo. La transferencia de agua se relaciona con su porosidad y su permeabilidad. Típicamente, la tasa de infiltración depende del impacto de las gotas de lluvia, la textura y estructura del suelo, su contenido inicial de humedad, la disminución de la humedad a medida que el agua penetra en los poros de las matrices, los cambios en su composición y en los suelos mojados que a su vez cierran las grietas. No toda la infiltración alcanza la zona saturada (agua subterránea) pues en mayor o menor proporción una parte se queda en la zona superior (agua edáfica) y vuelve a la atmósfera como evapotranspiración (NOAA, 2017).

3.2 Recarga de agua en un acuífero

A continuación, se da una definición de la palabra “acuífero”, se describen los procesos de descarga y recarga y las variables climatológicas que influyen en el cálculo de estimación de la recarga de agua subterránea.

3.2.1 Definición de un acuífero

Un acuífero, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 se denomina a: “cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo”.

El agua subterránea que se halla almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico. Se han realizado estudios que permiten estimar que aproximadamente el 30% del caudal de superficie proviene de fuentes de agua subterránea (GWP, 2011). Los acuíferos se clasifican, de acuerdo con la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos en:

i. Acuíferos libres, no confinados o freáticos: existe una superficie libre del agua encerrada en ellos que está en contacto directo con el aire y por lo tanto a presión atmosférica. Al perforar pozos que los atraviesen parcial o totalmente, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo forma una superficie real, superficie freática también conocida como “water table” (Custodio y Llamas, 1976).

ii. Acuíferos confinados, cautivos o a presión: Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante y el agua que se encuentra encerrada en ellos está sometida a una cierta presión mayor que la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Al perforar pozos en este tipo de acuíferos al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel de agua que se estabiliza en una determinada posición. Estos acuíferos poseen una superficie piezométrica ideal ya que los niveles que alcanzaría el agua en distintos pozos distribuidos por el acuífero equivalen a la altura piezométrica del agua del acuífero en la vertical de cada punto (GWP, 2011).

iii. Acuíferos semiconfinados o semicautivos: Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que el muro, el techo o ambos no son totalmente impermeables (es decir un acuitardo), lo que permiten una circulación vertical del agua muy lenta que alimenta al acuífero principal (Custodio y Llamas, 1976).

3.2.2 Recarga y descarga natural

La recarga natural es el volumen de agua que entra en un acuífero durante un periodo de tiempo a causa de la infiltración, de las precipitaciones o de un curso de agua. La recarga se divide en difusa, localizada y preferencial (Scalon et al., 2002). Está influenciada por el

clima, la geología, topografía, vegetación y uso del suelo y presenta variabilidad espacial y temporal (Shulz y García, 2015).

La descarga natural, es, por el contrario, el volumen de agua que en un periodo de tiempo sale del embalse subterráneo a través de los manantiales, subfluviales o submarinos y también por evapotranspiración, si la zona saturada queda cerca de la superficie del suelo. La descarga natural es equivalente a la escorrentía subterránea cuando los manantiales (submarinos o subfluviales) y la descarga por evapotranspiración es muy pequeña (Custodio y Llamas, 1976).

3.3 Influencia de la variabilidad climática en la recarga

Los parámetros que se utilizan para determinar el clima son: temperatura y precipitación. La variabilidad climática es, quizás, el factor más importante que influye en las tasas de recarga, debido a que la precipitación, que es la fuente de recarga natural, es el componente dominante en el balance de agua de la mayoría de los acuíferos (Healy, 2010). La relación entre la escala espacial y temporal de las lluvias y la recarga es entonces, un dato muy importante.

3.3.1 Temperatura

De acuerdo con Custodio y Llamas (1976), la temperatura expresa numéricamente el efecto que en los cuerpos produce el calor originado por el balance entre la radiación recibida y la emitida. Un dato muy importante es la temperatura del aire en las inmediaciones de la superficie terrestre. El aire se calienta o enfría a partir del suelo por distintos métodos de transmisión y por los cambios de estado físico del agua atmosférica. La variación de la temperatura sigue dos ciclos principales:

1. El ciclo diario: Presenta una forma sinusoidal con un máximo y un mínimo muy pronunciados.
2. El ciclo anual: También presenta una forma sinusoidal y sus máximas y mínimas dependen de la altitud y la latitud.

3.3.2 Precipitación

De acuerdo con NOAA (2017), la precipitación es el insumo principal del ciclo hidrológico. La precipitación es el proceso que ocurre cuando todas las formas de partículas de agua caen de la atmósfera y llegan al suelo. Hay dos subprocesos que causan que las nubes liberen la precipitación: a) el proceso de coalescencia y b) el proceso de cristal de hielo.

A medida que las gotas de agua alcanzan un tamaño crítico, la gota queda expuesta a la gravedad y al arrastre por fricción. Una gota que cae deja una estela turbulenta detrás de la cual permite que las gotas más pequeñas caigan más rápidamente. El otro subproceso que ocurre es la formación de cristales de hielo, cuando el hielo se desarrolla en nubes frías o en formaciones de nubes altas en la atmósfera donde existen temperaturas de congelación.

Cuando las gotas de agua se acercan a los cristales, algunas gotas se evaporan y se condensan sobre los cristales. Los cristales crecen a un tamaño crítico y caen como nieve. A veces, cuando los gránulos caen a través del aire de elevación inferior, se funden y se convierten en gotas de lluvia (NOAA, 2017). El agua precipitada puede caer en un cuerpo de agua o puede caer sobre el suelo, después se dispersa de varias maneras. El agua puede adherirse a objetos sobre o cerca de la superficie del planeta, puede ser transportada a través de la superficie en canales de corriente, puede penetrar en el suelo, o puede ser interceptada por las plantas. Cuando la cantidad de precipitación es pequeña e infrecuente, un alto porcentaje de precipitación regresa a la atmósfera por evaporación.

La porción de precipitación que aparece en las corrientes superficiales se llama escorrentía. La escorrentía puede ser superficial o subterránea. El escurrimiento superficial viaja sobre la superficie del suelo y a través de los canales superficiales para dejar una zona de captación llamada cuenca hidrográfica. La porción de la escorrentía superficial que fluye sobre la superficie terrestre hacia los canales de la corriente se denomina flujo por tierra. La escorrentía total confinada en los canales de la corriente se llama flujo de la corriente (NOAA, 2017).

Existen tres tipos de precipitación según el entorno meteorológico en que se desarrollen, y pueden ser una combinación de los tipos que se mencionan a continuación (Custodio y Llamas, 1976):

i.Precipitación convectiva: se origina por el calentamiento de las masas de aire próximas a la superficie del suelo que han recibido una fuerte insolación. Suelen ser tormentas locales propias de la estación cálida.

ii.Precipitación ciclónica: se originan en las superficies de contacto de las masas de aire (frentes) con temperatura y humedad diferentes. Puede ser un frente cálido o frío, o bien, por la oclusión de un frente.

iii.Precipitación orográfica: Es propia de las zonas montañosas y se origina por el enfriamiento y condensación de vapor de agua en las masas de aire, que al entrar en contacto con una ladera ascienden por ella.

3.3.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración se refiere al conjunto de pérdidas físicas (evaporación) y biológicas (transpiración de las plantas) del suelo por vapor de agua. Se expresa en mm por unidad de tiempo (IGME, 2017). Depende de factores climáticos (radiación, humedad del aire, viento), relativos a las plantas (cubierta vegetal) y edáficos (tipo de suelo, estado del suelo) por lo que es conveniente distinguir entre:

1.Evapotranspiración Real (ET_R): Es la que se produce en las condiciones naturales de humedad. Cuando la humedad del suelo es elevada, puede llegar a ser igual que la potencial.

2.Evapotranspiración Potencial (ET_P): Representa la cantidad total de agua que sería evapotranspirada, si las reservas fueran suficientes para compensar las pérdidas máximas considerando un suelo completamente cubierto de vegetación y constantemente abastecido de agua. En relación con la precipitación la ET_P se utiliza como un indicador de humedad o aridez climática (Schulz y García, 2015).

Para comprender los procesos asociados a la evapotranspiración, se deben conocer algunos conceptos referentes al almacenamiento del agua en el suelo (Figura 3.2). El agua se distribuye en dos zonas (Schulz y García, 2015):

1) Zona de Intersticios Conectados: Corresponde a aquella zona del suelo y subsuelo donde el agua se mueve a través de los poros interconectados. Se subdivide en dos medios:

- *Zona de Aireación (también llamada Zona Vadosa o Zona No Saturada):* generalmente se considera que la zona de aireación se extiende verticalmente desde la superficie del suelo hasta el nivel freático, aunque también este límite puede ser localizado en la parte superior de la franja capilar. Se subdivide en: i) zona de evapotranspiración (zona de alteración de los suelos), ii) zona de retención o intermedia (no tiene ningún vínculo con las capas inferiores, el volumen de agua es igual al coeficiente de retención específica) y iii) franja capilar (el agua puede fluir libremente si desciende al nivel freático, al cual está ligado hidráulicamente).
- *Zona de saturación:* se extiende entre el límite inferior de la franja capilar y el lugar más profundo donde hay espacios interconectados, el cual puede ser el basamento o alguna capa confinante inferior (impermeable) (Schulz y García, 2015).

2) Zona de intersticios no conectados: Debajo de la zona de saturación se localiza el agua interna, es decir aquella que está químicamente combinada, el agua almacenada en intersticios no comunicados y el agua de origen magmática (Schulz y García, 2015).

Para estimar la evapotranspiración existen diferentes métodos que se mencionan a continuación (Custodio y Llamas, 1976):

i.Métodos directos: Método del lisímetro, evapotranspirómetro, parcelas y cuencas experimentales y perfiles de humedad del suelo.

ii.Métodos empíricos: tanque evaporímetro, método de Thornthwaite, método de Turc, método de Hargreaves, método de Blaney y Criddle, método racional con la curva de Hansen, método de Griessen y Christiansen, método de Penman simplificado.

iii. Métodos basados en Física teórica del microclima: balance de energía, perfiles de humedad y velocidad del viento, flujo turbulento de humedad y fórmulas semi-empíricas o combinadas.

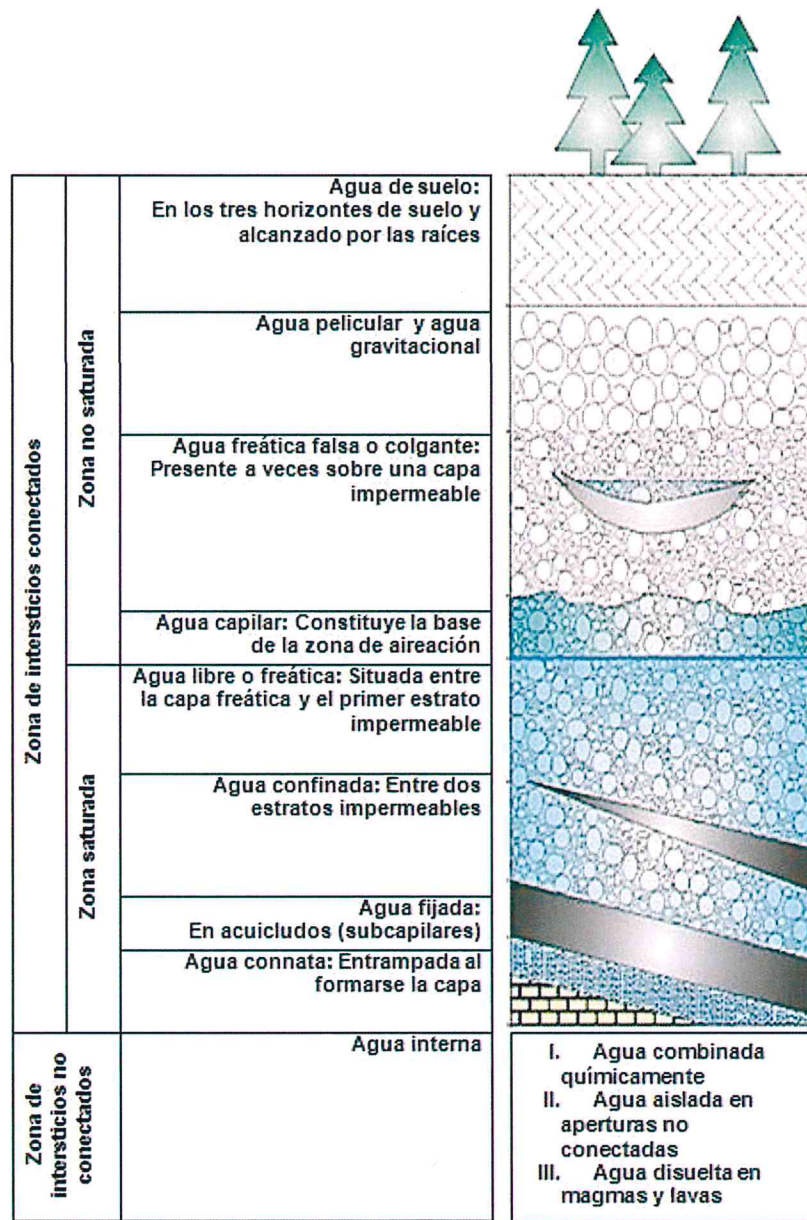


Figura 3.2 Distribución del agua en el suelo y subsuelo. Tomado de Castany (1971)

3.4 Métodos para la estimación de la recarga

Existen diversos métodos para estimar la recarga (Tabla 3.1) de acuerdo con (Vélez y Vásquez, 2004)

Tabla 3.1 Resumen de métodos para la estimación de la recarga

Método	Descripción
Medidas directas	La recarga se mide directamente mediante la construcción de lisímetros. Un lisímetro es un bloque de suelo dotado de dispositivos que permiten medir el flujo que drena hasta el acuífero.
Balance hídrico	Se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance; forman parte de este grupo los balances de humedad del suelo, de agua en canales, el método de fluctuaciones del nivel freático, los modelos numéricos y el método que iguala la descarga a la recarga.
Trazadores	Su principal uso es determinar fuentes de recarga y zonas de descarga, y se utilizan para cuantificar la recarga a través de un balance de masa del trazador.
Aproximaciones de Darcy	Se aplican las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq y luego se determina la velocidad de filtración. Si se asumen condiciones estables la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy.
Empíricos	Consiste en el desarrollo de ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación. Este método permite estimar la recarga en áreas urbanas.

Fuente: Vélez y Vásquez (2004)

3.5 Estimación de la recarga de agua subterránea mediante los métodos de balance

El balance hídrico es un cálculo del movimiento de agua dentro del sistema y fuera de él, así como el cambio de almacenamiento dentro de un cierto volumen de agua. Los métodos de balance hídrico representan la mayor clase de técnicas que se emplean para estimar la recarga. La mayoría de los modelos hidrológicos se derivan de una ecuación de balance hídrico. Los componentes para generar las ecuaciones de balance hídrico típico son precipitación, evapotranspiración, escorrentía y agua almacenada. Las escalas espaciales y temporales juegan un rol importante en la selección del método adecuado (Healy, 2010).

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en el principio de conservación de masas (o ecuación de continuidad), el cual establece que para cualquier volumen arbitrario

y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por el volumen de agua almacenada. La ecuación de balance hídrico, indica los valores relativos de entrada y salida del flujo y la variación de volumen de agua almacenada (Instituto de Hidrología de España-UNESCO, 1981).

El primer paso para hacer un balance hídrico es elegir uno o más volúmenes de control que puede ser una columna de suelo en laboratorio, un lago o corriente, una cuenca o un acuífero. Posteriormente, se aplicará la ecuación de balance general. El balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo en su forma más general se representa con la ecuación:

$$P+Q_{Si}+Q_{Ui}-ET-Q_{So}-Q_{Uo}-\Delta S-V=0.....(ec.1)$$

Dónde:

- P = Precipitación
- Q_{Si} = Entradas de agua superficiales
- Q_{Ui} = Entradas de agua subterráneas
- ET = Evapotranspiración
- Q_{So} = Salidas de agua superficiales
- Q_{Uo} = Salidas de agua subterráneas
- ΔS = Volumen de agua almacenada
- V = Residual o diferencia

A continuación, se muestra el método de balance aplicado al modelo conceptual del Acuífero del Valle de Toluca (Figura 3.3):

/ Cabe mencionar que en este estudio se elegirán los parámetros de la ecuación general que se apliquen de acuerdo con el modelo conceptual del AVT.

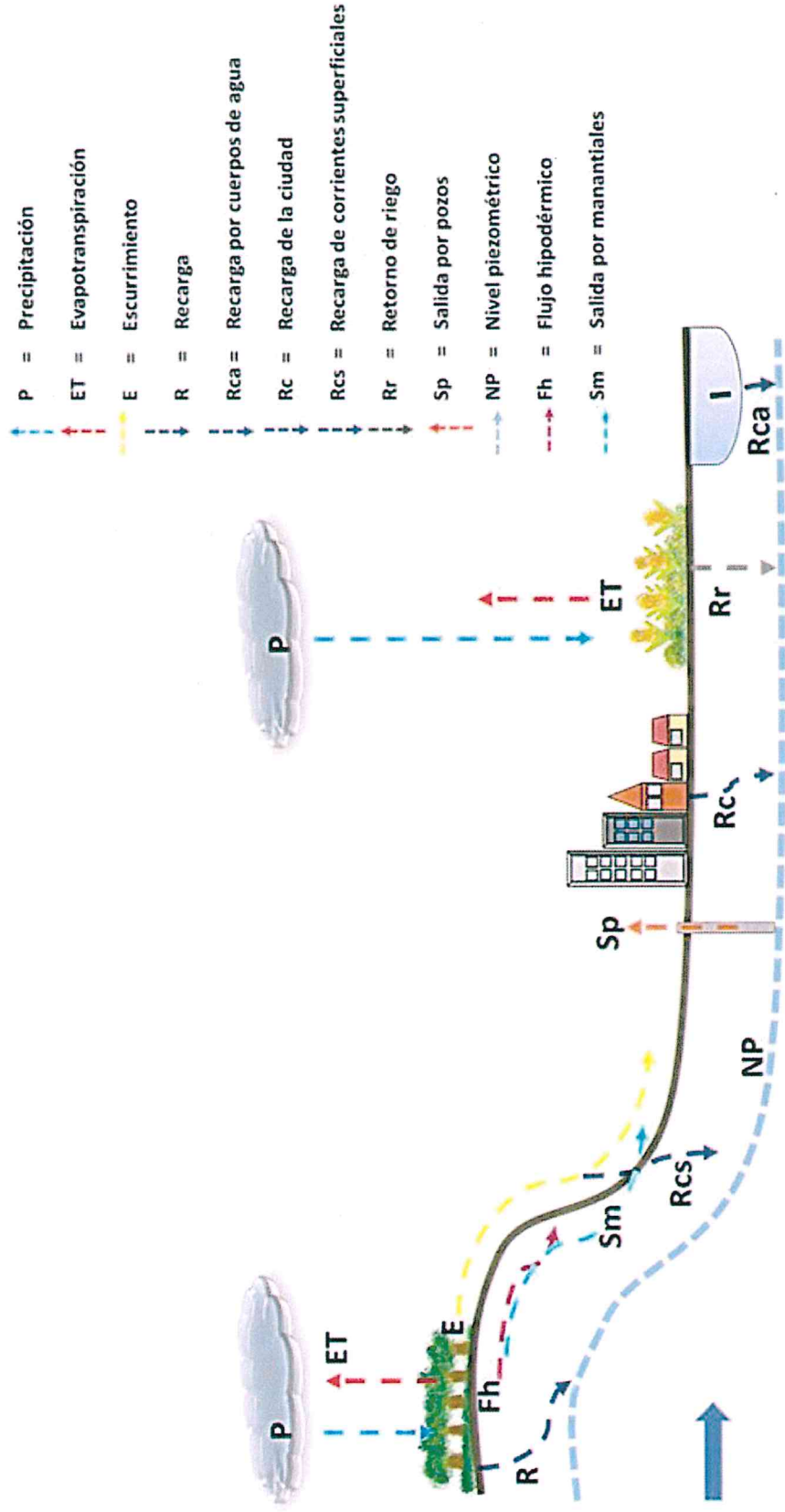


Figura 3.3 Esquema del modelo conceptual de los procesos de la recarga (Elaboración propia en base a Healy, 2010)

3.5.1 Método de balance hídrico del suelo (hidrometeorológico)

El balance hídrico del suelo para estimar la recarga consta de dos componentes: un sub-balance hídrico para la zona radicular que estima la cantidad de drenaje en la base de esa zona y un sub-balance que estima el transporte del agua drenada al nivel freático. La recarga (R) se estima con la siguiente ecuación (Schulz y García, 2015):

$$R=P-ET-\Delta S-R_0 \dots\dots\dots(ec.2)$$

Dónde:

- P = Precipitación más irrigación
- ET = Evapotranspiración
- ΔS = Volumen de agua almacenada
- R_0 = Escorrentía

Implícitamente en este enfoque, se asume que la máxima cantidad de agua almacenada dentro de la zona radicular (denominado plano de flujo cero) no varía con el tiempo. La ecuación anterior se utiliza generalmente para valores diarios, pero puede utilizarse para valores semanales y mensuales, aunque se debe considerar que es sensible a la escala de tiempo a la que se va a trabajar (Healy, 2010).

3.5.2 Método de balance hidrológico del acuífero

Para estimar adecuadamente la recarga, es indispensable generar un balance hídrico preliminar, que proveerá al investigador con valiosa información e insumos para estimar la recarga. Cualquier volumen de control cuyo balance hídrico contenga en su ecuación el componente recarga, se puede utilizar para estimar la recarga. Por lo tanto, la recarga total que recibe un acuífero en un intervalo de tiempo dado, se determina por medio del balance de aguas del subsuelo, que en su forma más simple está representado por la siguiente expresión (DOF, 2015):

$$E-S = \pm \Delta S \dots\dots\dots(ec.3)$$

Dónde:

E = Entradas

S = Salidas

ΔS = Volumen de agua almacenada

3.6 Retos para la adecuada estimación de la recarga de agua subterránea

Existen diversos retos en la estimación de la recarga de agua subterránea, los errores más comunes se asocian a la falta de mediciones o información con la suficiente escala espacial o temporal. Los errores de medición se refieren a las incongruencias en la recopilación de los datos. Las complicaciones surgen porque la magnitud de un flujo de recarga es generalmente muy pequeña y a menudo no se puede medir directamente. Es decir, depende de la cantidad y calidad de los datos recopilados, lo cual hace ineludible la búsqueda de datos en fuentes fiables y con la escala requerida para cualquier proyecto. De igual forma, existen retos en cuanto al manejo y tratamiento de la información y finalmente de la forma de interpretarla y visualizarla. En la actualidad, los tomadores de decisiones pueden servirse de los Sistemas de Información Geográfica para facilitar el tratamiento de la información, así como la forma de transmitirla.

3.7 Los SIG como herramienta para la estimación de la recarga

Existen diversos Sistemas de Información Geográfica (SIG) y hay diversas definiciones de los SIG. De acuerdo con Eastman (2012), un SIG es un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, análisis y visualización de los datos geográficos. Existe una gran cantidad de herramientas software para asistir estas tareas y pueden variar significativamente en la forma como representan y trabajan los datos geográficos y al énfasis relativo que les dan a las operaciones (Estman, 2012).

En la actualidad, se han desarrollado diferentes softwares que permiten realizar el análisis de los componentes del ciclo hidrológico, como es el caso del cálculo de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, el volumen de escurrimiento y la recarga de agua subterránea. El amplio espectro de herramientas que ofrecen los SIG aportan avances

significativos en la toma de decisiones y trabajan con dos tipos de información: tipo ráster y tipo véctor.

3.7.1 Información de tipo ráster y tipo vector

El modelo lógico hace referencia a como se muestrean y organizan las variables y objetos para lograr una representación lo más adecuada posible. En un SIG existen básicamente dos modelos lógicos que se conocen como formato ráster y formato vectorial y que dan lugar a los dos grandes tipos de capas de información espacial. En el formato ráster se divide el espacio en un conjunto regular de celdas, cada una de estas celdas contiene un número que puede ser el identificador de un objeto (si se trata de una capa que contiene objetos) o del valor de una variable (si la capa contiene esta variable). En el formato vectorial los diferentes objetos se representan como puntos, líneas o polígonos (Universidad de Murcia, 2006). Los SIG también contienen herramientas con las cuales, a partir de información en tipo ráster o vector, se puede generar nueva información; por ejemplo: herramientas para análisis, operaciones matemáticas, operadores de distancia, intercambio de formato, operadores de contexto como los análisis de superficie, interpolación, etc.

3.7.2 Herramientas para la interpolación de la información climática

Según ESRI (2017) la interpolación predice valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido, etc. En la tabla 3.2, se describen las diferentes herramientas de interpolación disponibles en los SIG.

3.7.2.1 Software ANUSPLIN

ANUSPLIN es un programa desarrollado en la Escuela Fenner de Medio Ambiente y Sociedad de la Universidad Nacional Australiana (ANU), que se ajusta a un número arbitrario de funciones de spline de suavizado de placas finas (parciales) de una o más variables independientes. Es adecuado para conjuntos de datos con hasta 10,000 puntos, aunque los conjuntos de datos pueden tener arbitrariamente muchos puntos. Utiliza nudos

determinados directamente por “spline” o por procesos de salida. Los nudos se eligen a partir de los puntos de datos para adaptarse a la complejidad de la superficie ajustada. Normalmente no debe haber más de 2000 a 3000 nudos, aunque se permiten conjuntos de nudos arbitrariamente grandes. El grado de suavizado de datos se determina normalmente minimizando la validación cruzada generalizada (GCV) o la máxima verosimilitud generalizada (GML) de la superficie ajustada. ANUSPLIN también permite transformaciones tanto de variables independientes como dependientes y permite el procesamiento de conjuntos de datos con valores faltantes. Se utilizó para interpolar los datos climáticos.

Tabla 3.2 Herramientas para la interpolación en un SIG.

Método	Descripción
IDW	La herramienta IDW (Ponderación de distancia inversa) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el cálculo del promedio
Kriging	Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con valores z. Aún más que con otros métodos de interpolación, se debe realizar una investigación profunda del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida
Vecino natural	La interpolación de Vecino natural encuentra el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Sibson, 1981). También se conoce como interpolación de Sibson o de "robo de área"
Spline	La herramienta Spline utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada
Spline con barreras	La herramienta Spline con barreras utiliza un método similar a la técnica usada en la herramienta Spline, pero la principal diferencia es que distingue las discontinuidades codificadas tanto en las barreras de entrada como en los datos del punto de entrada
De topo a ráster	Las herramientas “De topo a ráster” y “De ráster a topo” en un archivo utilizan una técnica de interpolación diseñada específicamente para crear una superficie que representa con mayor precisión una superficie de drenaje natural y preserva mejor las cadenas montañosas y las redes de arroyos de los datos de curvas de nivel de entrada. El algoritmo que se utiliza está basado en el de ANUDEM, desarrollado por Hutchinson y otros en la Universidad Nacional de Australia
Tendencia	Tendencia es una interpolación polinómica global que ajusta una superficie suave definida por una función matemática (polinómica) a los puntos de muestra de entrada. La superficie de tendencia cambia gradualmente y captura patrones de escala sin ahondar en los datos

Fuente: ESRI (2017)

3.7.3 Módulo Earth Trends Modeler del SIG Terrset

El Módulo Earth Trends Modeler (ETM o Modelador de Tendencias Terrestres) es un conjunto integrado de herramientas dentro de TerrSet para el análisis de datos de series temporales de imágenes asociadas con imágenes de percepción remota para la observación de la Tierra.

Con Earth Trends Modeler, es posible evaluar rápidamente las tendencias climáticas a largo plazo, medir las tendencias estacionales en fenología y descomponer las series temporales de imágenes para buscar patrones recurrentes en el espacio y el tiempo.

El software está diseñado específicamente para la investigación y análisis de cambios globales, como la exploración de eventos climáticos como el Niño o relacionados con las fluctuaciones de la temperatura superficial y sus impactos geográficos, capitalizando los archivos de series de tiempo globales de imágenes que actualmente están disponibles para abordar estos problemas y es una aplicación vertical dentro de TerrSet que proporciona una gran cantidad de herramientas para el análisis de las tendencias y las características dinámicas de los fenómenos ambientales. Se compone de tres pestañas: exploración, análisis y pre-proceso, las cuales permiten realizar los siguientes procesos (Eastman, 2015):

- a) *Explorar*: para visualizar y examinar series de imágenes y resultados analíticos
- b) *Analizar*: permite realizar el análisis de series de imágenes individuales y múltiples a través de una variedad de procesos
- c) *Pre procesar*: para realizar el pre-proceso de imágenes y editar series de imágenes para su análisis

Las características principales del ETM incluyen:

- Extracción y análisis de las tendencias globales a largo plazo y sus impactos
- Examinar la relación entre series de tiempo
- Examinar las tendencias de la estacionalidad
- Aislar el verdadero cambio de la variabilidad ambiental normal
- Descubrir y analizar patrones de variabilidad a través de escalas temporales

- Datos de la serie temporal de imágenes de pre-procesamiento incluyendo eliminación de ruido y desagrado

Las características analíticas del módulo ETM incluyen:

- Visualización 3D animada de cubos espacio-tiempo
- Correlación dinámica de *lag2* entre series cronológicas de índices
- Análisis de tendencias de la serie temporal de índices
- Perfiles temporales interactivos
- Análisis de tendencias de series de imágenes
- Análisis estacional de tendencias

3.7.4 Módulo Emergía del agua subterránea del SIG Terrset

De acuerdo con Fonseca (2014), el sistema de modelos termohidrológicos es una herramienta práctica y útil para la toma de decisiones en temas relacionados con la asignación de recursos hídricos, la identificación de restricciones en explotación de agua y la planeación para suministro de agua desde diversas fuentes hacia usos agrícolas, industriales y públicos. El Módulo Emergía del agua subterránea, se diseñó con el propósito de desarrollar un método de evaluación de la eficiencia económica, energética y ambiental bajo un enfoque termodinámico en una cuenca hidrográfica por medio del análisis de los procesos hidrológicos, socioeconómicos y ambientales en el suministro de agua a través de un sistema de modelos termohidrológicos para la optimización de la asignación de recursos hídricos.

Aunque el usuario puede generar información de escurrimiento, evapotranspiración e infiltración de manera externa al módulo de Emergía del agua, cabe resaltar que Terrset tiene el potencial para ser una plataforma de un módulo que desarrolle métodos más completos como Pennman-Monteith. En este caso, con el módulo de Emergía del agua, es posible, generar información en un formato distribuido especialmente sobre escurrimiento,

² *Lag*: Se refiere a los intervalos en que las series de tiempo pueden ser analizadas. Comúnmente un intervalo negativo es llamado guía (*lead*) y un intervalo positivo es llamado intervalo (*lag*)

evaporación e infiltración con un método para cada uno (coeficiente de escurrimiento y balance hídrico respectivamente).

Para estimar la evapotranspiración de referencia, el módulo está programado para utilizar el método de Thornthwaite, el cual requiere de temperatura media mensual y número de horas de Sol diarias, y es utilizado en normatividades como la mexicana (SEMARNAT, 2005). El método de Thornthwaite (1948) está basado en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número del día del mes. Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial. A través del balance hídrico (Fonseca, 2014), la forma de estimar la tasa de infiltración I_j en una escala temporal j (mensual o anual), así como el escurrimiento potencial ($P_j \times K_{ej}$), en una cuenca queda expresada por la siguiente ecuación (DOF, 2005; Franco, 2008):

$$I_j = P_j - (P_j \times K_{ej}) - ET_{0j} \dots\dots\dots(\text{ec.4})$$

Dónde:

- ET_{0j} = Evapotranspiración de referencia
- K_e = coeficiente de escurrimiento que representa las características físicas superficiales y geológicas del terreno en un rango entre 0 y 1

Para determinar el coeficiente de escurrimiento, los factores que más influencia tienen sobre la relación entre el escurrimiento y la precipitación (Fonseca, C; 2014) son el uso de suelo, la permeabilidad y la pendiente del suelo. Benítez et al. (1980) muestran un rango de valores del coeficiente de escurrimiento (Tabla 3.3) en función de las tres variables mencionadas: cobertura del suelo, tipo de suelo y pendiente.

Tabla 3.3 Coeficientes de escurrimiento

Cobertura del suelo	Tipo de suelo	Pendiente porcentaje (%)				
		>50	20-50	5-20	1-5	0-1
Sin vegetación	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
Cultivos	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
Hierba	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

Fuente: Benítez, C., Arias, W., Quiroz, J. (1980) Manual de conservación de suelos y aguas, Ministerio de Agricultura y Alimentación, Lima, Perú

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

En el presente capítulo “Metodología”, se presenta en primera instancia, el esquema de metodología general (Figura 4.1) que describe los pasos a seguir para la consecución del presente proyecto. Posteriormente, la metodología para obtener la recarga de agua subterránea primero con el método de balance hídrico del suelo y después con el método de balance hídrico del acuífero.

Las herramientas, como los Sistemas de Información Geográfica, coadyuvan, entre otros estudios, a los cálculos de recarga de agua subterránea. En este contexto, se utilizan los softwares como Terrset y ArcGIS ya que contienen diferentes módulos para la interpolación, digitalización, conversión, etc. y permiten a los tomadores de decisiones no solo visualizar la información, sino relacionarla e interpretarla. Es por esta razón, que a lo largo de este proyecto se ha hecho uso de los SIG.

Esquema de la metodología general

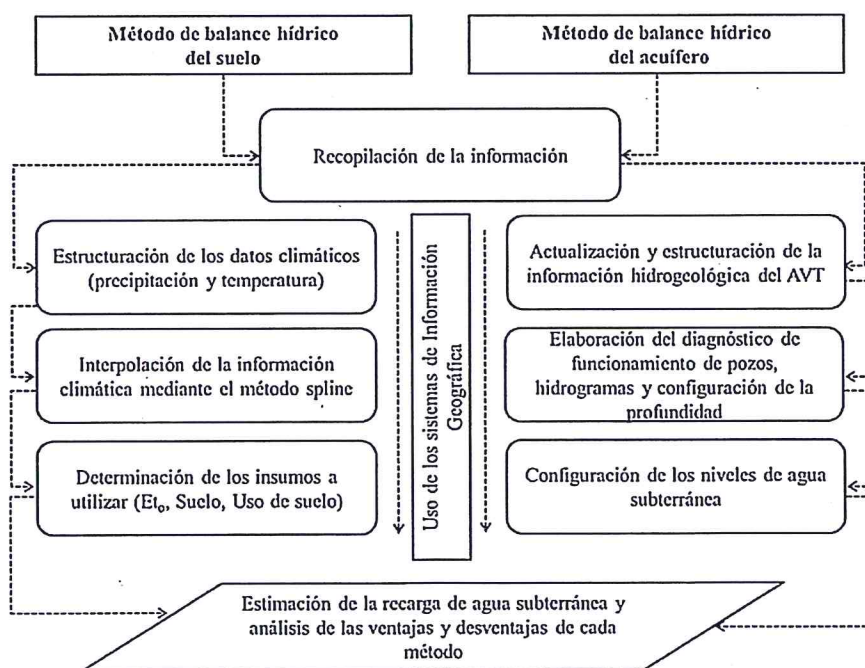


Figura 4.1 Esquema metodológico

4.1 Recopilación de la información

El proceso de recopilación de la información climatológica y piezométrica de la zona de estudio, se realizó en las diferentes dependencias académicas y gubernamentales. La información climatológica se obtuvo de la base de datos del CLICOM para el periodo comprendido de 1960-2015 y está desglosada por datos diarios o mensuales de cada Entidad de la República Mexicana. Por otro lado, la información piezométrica que se recabó pertenece a CONAGUA y comprende los datos de nivel de agua subterránea de los multipiezómetros que conforman el Acuífero del Valle de Toluca para el periodo comprendido entre 1960-2017.

4.2 Método del balance hídrico de suelo

A continuación, se desglosan los pasos metodológicos que se siguieron para calcular la recarga potencial por medio del método del balance hídrico del suelo:

- ✓ Estructuración y análisis de los datos climáticos (precipitación y temperatura) periodo 1960-2015
- ✓ Interpolación de la información climática mediante el método spline (se utilizó la serie conformada por Ordoñez, 2015)
- ✓ Determinación de los insumos a utilizar

Los insumos que se utilizaron son:

- Límite físico del acuífero del Valle de Toluca
- Precipitación media del periodo de lluvias (mayo a octubre) de ambas temporalidades (1984-1996 y 2010-2015)
- Temperatura media del periodo de lluvias (mayo a octubre) de ambas temporalidades (1984-1996 y 2010-2015)
- Modelo digital de elevación
- Imagen de textura del suelo
- Imágenes de uso del suelo de ambas temporalidades (1984-1996 y 2010-2015)

4.2.1 Estructuración de los datos climáticos (precipitación y temperatura) para el periodo comprendido entre 1960 – 2015

Los datos climatológicos se obtuvieron de la base de datos de estaciones climáticas superficiales de México de CLICOM, del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) este es un sistema de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa Climate Computing Project. Las observaciones son diarias y representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 am. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos desde 1920 (CICESE, 2017).

Se consideraron dos intervalos: el primero de 1984-1996 y el segundo fue 2010-2015 de la serie elaborada por Ordoñez, (2015) para conformar la base de datos de precipitación y temperatura.

4.2.2 Interpolación de la información climática mediante el método spline

De la serie conformada por Ordoñez (2015), se hicieron carpetas de precipitación mensual, temperatura mínima y temperatura máxima del periodo comprendido entre 1984-1996 (obteniendo 13 imágenes, una por cada año del periodo) y 2010-2015 (obteniendo 6 imágenes, una por cada año del periodo). Posteriormente, se acomodaron en grupos de imágenes ráster (*raster group*) en el software Terrset. Primero se obtuvo el promedio de temperatura máxima y el promedio de la temperatura mínima de cada periodo. En este proceso, en el módulo de *Macro Modeler*, se sumaron las imágenes de temperatura máxima con el módulo *add-raster group* y se dividieron con el módulo *scalar-divide* entre 13, para el primer periodo y entre 6 para el segundo periodo, después los resultados de cada uno de los periodos de forma independiente se sumaron y se dividieron entre dos para obtener la temperatura media de cada periodo.

4.2.3 Elaboración de los perfiles de precipitación y temperatura

En el módulo *Earth Trends Modeler*, del software Terrset, en la pestaña de Exploración, se incluye la herramienta de elaboración de perfiles temporales que facilita el análisis de la información. Es necesario iniciar una nueva sesión en el panel *ETM Session Parameters*.

Este panel permite especificar, editar y crear los archivos esenciales, asociados al análisis de las series de tiempo de la zona de estudio, así como asignar el nombre del proyecto. Solamente las series asociadas en el panel, se pueden procesar en el módulo ETM.

Después se creó el archivo TSF (Time Series File), para el cual, se despliega un diálogo donde se especifican los parámetros necesarios de la serie de tiempo; por ejemplo, unidades, temporalidad o tipo de serie (diaria, mensual, anual, etc). En el módulo se ingresó la información de precipitación y temperatura como grupos ráster, lo que permitió visualizar en la pestaña *Explore Temporal Files*, en formato de cubo y en formato de mapa la distribución espacial y temporal de estos parámetros; utilizando para ello el archivo tipo vector del límite del AVT como base. También se generaron los perfiles temporales en el mismo módulo exportando la información a Excel para elaborar los gráficos.

4.2.4 Precipitación media y temperatura media del periodo de lluvias (mayo a octubre) de ambas temporalidades (1984-1996 y 2010-2015)

Para obtener las imágenes de precipitación media del periodo de lluvias se creó un *ráster group* de las imágenes de precipitación comprendidas entre los meses de mayo a octubre, las cuales se sumaron en el *Macro Modeler* con el módulo *add-raster group*. Después se extrajo un promedio con el módulo *Extract- Average- tabular output*. Para obtener las imágenes de temperatura media del periodo de lluvias se creó un *ráster group* de las imágenes de temperatura media comprendidas entre los meses de mayo a octubre, las cuales se sumaron en el *Macro Modeler* con el módulo *add-raster group*. Después se extrajo un promedio con el módulo *Extract- Average- tabular output*. La tabla que se obtuvo se exportó a Excel se hizo la sumatoria y se dividió entre el número de meses (equivalente a 6) para obtener el promedio.

4.2.5 Modelo Digital de Elevación

El Modelo Digital de Elevación (MDE) se descargó del portal Earth Explorer USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), la imagen en formato TIFF a una resolución de 30 m de la zona de estudio. La imagen se importó al software Terrset en formato TIFF con el módulo *Import-Desktop Publishing Formats -GeoTIFF/TIFF to Idrisi* a formato ráster. Se copiaron

los parámetros de referencia de otra imagen del proyecto. Las imágenes estaban en coordenadas geográficas (LATLONG) por lo que se cambió la proyección a UTM14N.

4.2.6 Tipo de suelo

La imagen de tipo de suelo del AVT fue elaborada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad CONABIO (2001) escala 1:1000 000. El archivo de tipo de suelo en formato vectorial contenía 135 polígonos en su tabla de atributos que incluía la columna de permeabilidad (permeable, semipermeable e impermeable). Esta tabla se importó a Terrset, así mismo se proyectó de coordenadas geográficas (LATLONG) a un sistema proyectado (UTM-14N).

En este archivo se asignaron los valores de textura fina, mediana y gruesa (Tabla 4.1) y se creó un archivo AVL para asignar un nuevo valor a los atributos con el módulo *Assign*. Para ingresar el tipo de suelo en el Módulo *Groundwater emergy* de Terrset en el *Macro Modeler* se multiplicaron las imágenes de uso de suelo por 100 utilizando el módulo *scalar* para obtener valores entre 100 y 300.

Tabla 4.1 Valores de reclasificación de textura de suelo

Valor anterior	Nuevo valor
Textura gruesa (3)	Textura fina (100)
Textura media (2)	Textura media (200)
Textura fina (1)	Textura gruesa (300)

4.2.7 Uso de suelo

Para calcular la infiltración potencial con el Módulo *Groundwater emergy de Terrset* (Fonseca, 2014), se utilizaron las imágenes de uso de suelo del año 1986 elaborada por Gómez *et al* (2012) como parte del “Taller Internacional Clima, sequía y agua subterránea: Implicaciones a ecosistemas y población” con resolución de 30 m.

Así mismo, la imagen de uso de suelo del año 2016, con resolución de 60 m, elaborada por López, S. (2018) como parte de la Tesis Doctoral denominada “Estrategias para la protección de manantiales: propuesta metodológica de acuerdo al entorno físico-social y proyección de escenarios”. A continuación, se muestran las imágenes de los años 1986 y 2016 (Figura 4.2 y 4.3). Las imágenes con las categorías de uso de suelo se multiplicaron por 10 para obtener valores entre 10 y 60 para el primer periodo y entre 10 y 70 para el segundo periodo, debido a que tenían diferente cantidad de categorías de uso de suelo para cada periodo (6 para el primer periodo y 7 para el segundo periodo).

Debido a que las imágenes de uso de suelo no seguían el orden: 1) suelo desnudo, 2) cultivo, 3) pastizal, 4) bosques, 5) zonas urbanas, se reclasificaron los archivos originales asignando un nuevo valor a los atributos con el módulo *Assign* de Terrset.

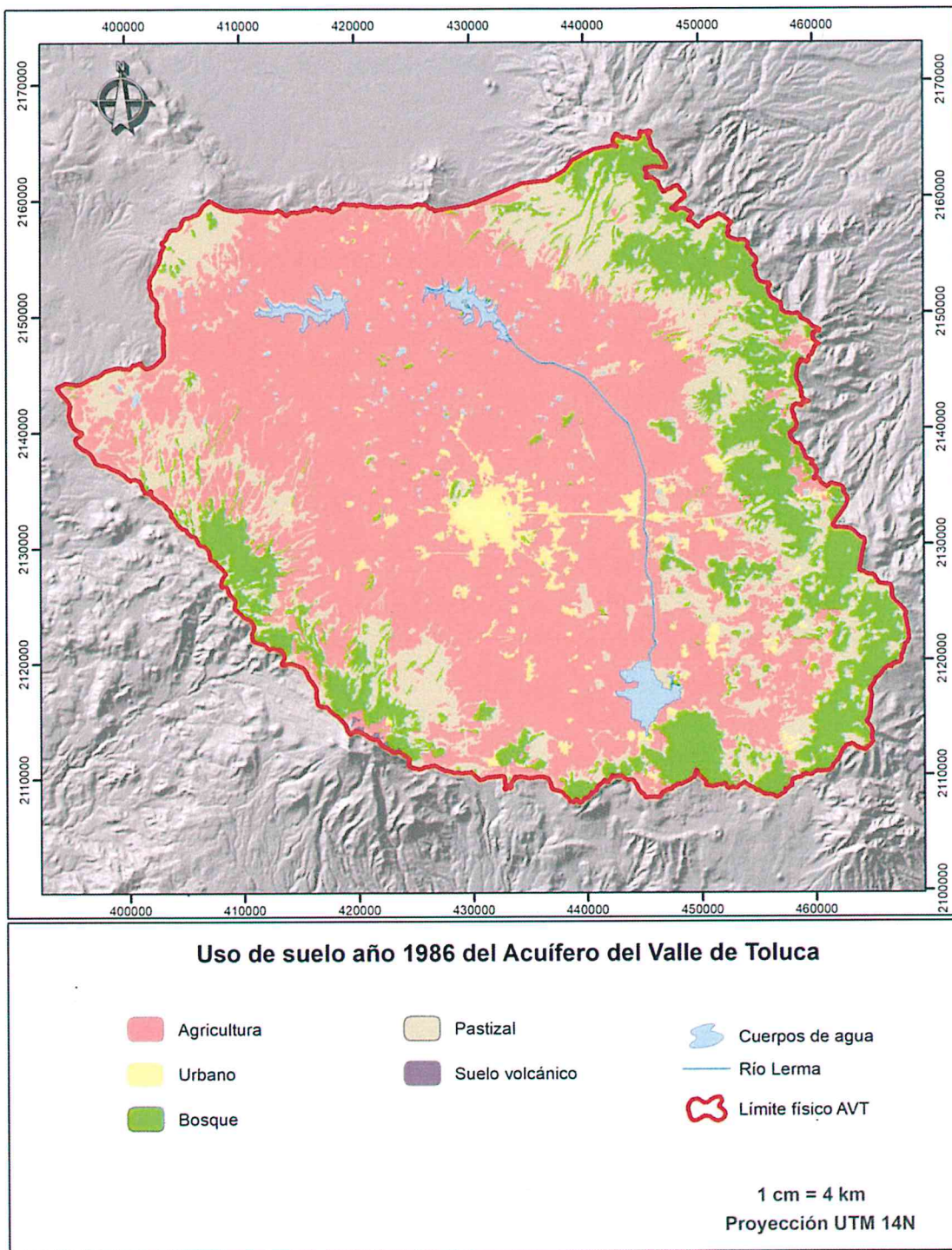


Figura 4.2 Uso de suelo en el Acuífero del Valle de Toluca 1986. CIRA (2015)

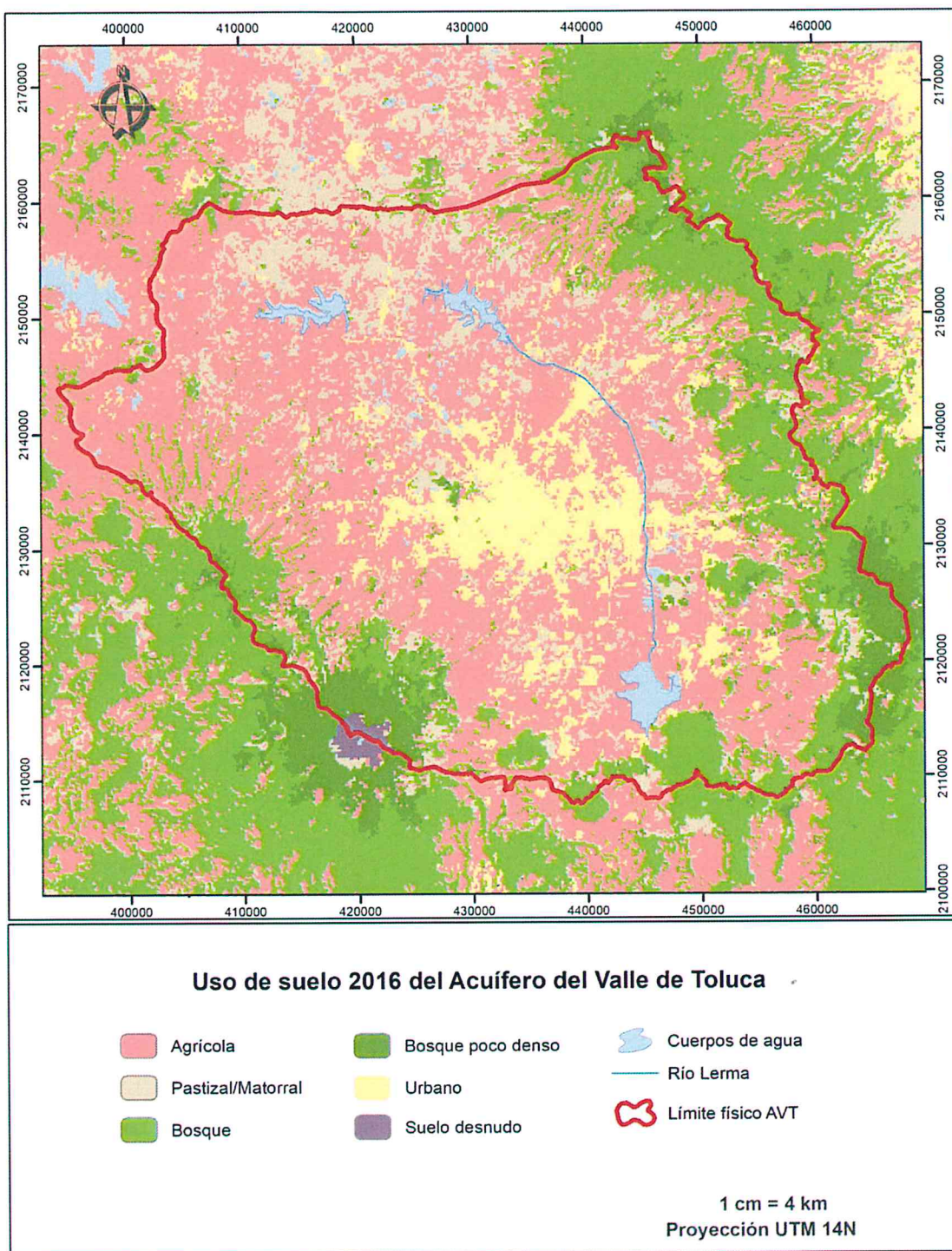


Figura 4.3 Uso de suelo en el Acuífero del Valle de Toluca 2016. López (2018)

4.2.8 Determinación de la evapotranspiración, el escurrimiento y la infiltración potencial del Acuífero del Valle de Toluca

Finalmente, al tener todos los insumos se calculó el escurrimiento natural de la cuenca, la evapotranspiración y la infiltración potencial del AVT utilizando el módulo *Groundwater Energy* de Terrset (Figura 4.4) ingresando los insumos: Área de recarga que corresponde al límite físico del AVT en formato ráster, la precipitación media del periodo de lluvias de ambas temporalidades en formato ráster group file, la temperatura media del periodo de lluvias de ambas temporalidades en formato ráster group file, el Modelo de Elevación Digital en formato ráster, la imagen de textura del suelo en formato ráster, la imagen de uso de suelo en formato ráster, y se ingresó la latitud 20° Norte (en la cual se ubica el AVT). Se obtuvieron como resultado grupos de imágenes ráster de escurrimiento, evapotranspiración e infiltración potencial. Estos grupos de imágenes ráster se sumaron en el *Macro Modeler* con el módulo *add-raster group*. Después se extrajo un promedio con el módulo *Extract* opción *Average- tabular output*. Los datos que se obtuvieron se exportaron a Excel.

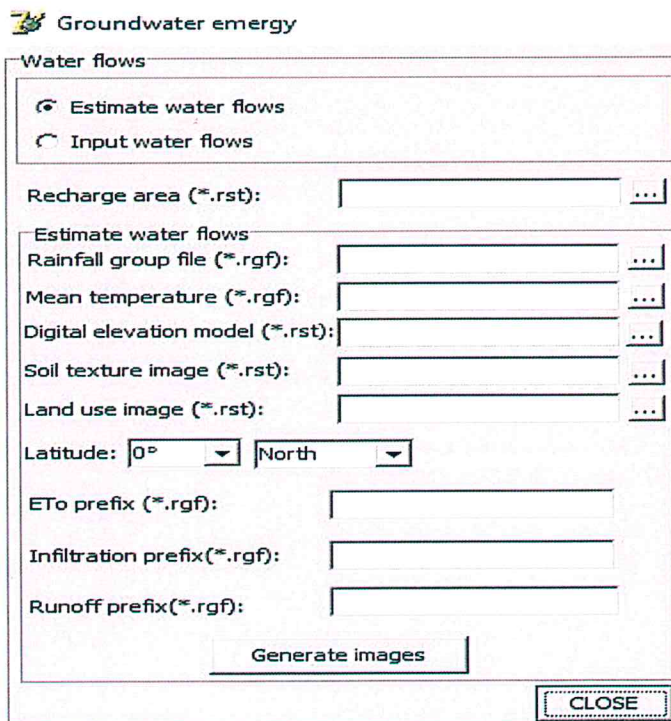


Figura 4.4 Módulo *Groundwater energy*, Terrset

4.3 Método del balance hidrológico del acuífero

A continuación, se desglosan los pasos metodológicos que se siguieron para calcular la recarga total de agua subterránea por medio del método del balance hidrológico del acuífero. Cabe mencionar que, en el caso de México, particularmente para el Acuífero del Valle de Toluca, en el cálculo de la disponibilidad del agua subterránea, se aplica este procedimiento indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000.

- Estructuración y análisis de la información hidrogeológica del agua subterránea en el AVT
- Elaboración del diagnóstico del funcionamiento de los piezómetros
- Configuración de los niveles piezométricos
- Configuración de la evolución de los niveles de agua subterránea

Los insumos que se utilizaron fueron los siguientes:

- Volumen de roca drenada
- Abatimiento promedio del periodo
- Abatimiento promedio anual
- Volumen de agua drenada

4.3.1 Estructuración y actualización de la información hidrogeológica del agua subterránea en el AVT

La base de datos de la piezometría de la zona de estudio se obtuvo en CONAGUA, así como del trabajo realizado en campo en Marzo de 2017 (Figura 4.5) donde se sondearon algunos pozos de la zona de interés y donde se pudo corroborar que algunos pozos han sido destruidos, tapados o en algunos casos vandalizados dejando las estructuras inservibles. Para estructurar las bases de datos se utilizó el programa Excel para digitalizar la información más reciente ya que se tenía en formato análogo. Las bases de datos se actualizaron al año 2017, ya que solamente contenían información hasta el año 2015 y en algunos casos hasta el año 2016.



Figura 4.5 Evidencia de trabajo en campo Marzo 2017 AVT

4.3.2 Elaboración del diagnóstico de funcionamiento de pozos, hidrogramas históricos y anuales y configuración de la profundidad de los niveles piezométricos

Se elaboraron los hidrogramas históricos y anuales de cada multipiezómetro para poder generar un diagnóstico del funcionamiento de los multipiezómetros el cual se encuentra en el apartado de “Anexos” del presente documento. Con los hidrogramas se redujo el universo de datos de piezometría ya que se observó que, en algunos casos, todas las sondas brotaban desde su instalación en la década de 1960 y en otros casos los pozos habían sido destruidos o tapados en las primeras décadas de su instalación. El diagnóstico, se dividió en tres clases, funciona, funciona parcialmente y no funciona. La determinación de estas clases está basada en los siguientes criterios:

Funciona: Cuenta con mediciones continuas en la mayoría de sus sondas a partir de los años 1970 hasta el año 2017.

Funciona parcialmente: Cuenta con mediciones continuas para el periodo antes mencionado y en los intervalos que no hay medición, el dato se puede determinar mediante la obtención de la tendencia estadística de las mediciones de la sonda.

No funciona: La mayoría de las sondas no cuenta con mediciones continuas para el periodo evaluado. En esta clasificación se encuentran también aquellos multipiezómetros que han sido clausurados, vandalizados o que tenían presencia de abejas en la mayoría de los años.

Para acotar el universo de datos, se eligieron los periodos 1984-1996 y 2010-2015 debido a que, de acuerdo con los hidrogramas históricos anuales y el diagnóstico de funcionamiento de los multipiezómetros, estos periodos son representativos debido a su dinámica, es decir, presentaban descensos, recuperación o en algunos casos anomalías y de acuerdo al diagnóstico funcionaban. A partir de las bases de datos de los hidrogramas anuales se obtuvieron los niveles piezométricos de los multipiezómetros y se eligió la sonda profunda (aproximadamente a 100 m de profundidad). Los niveles piezométricos se obtuvieron mediante la siguiente ecuación:

$$NP=Z-PN.....(ec.5)$$

Dónde:

- NP = Nivel piezométrico
- Z = Cota del multipiezómetro
- PN = Profundidad del nivel del agua subterránea en la sonda (100 m)

Los resultados se interpolaron manualmente mediante el método de triangulación. Se obtuvo el nivel inicial y final de ambos periodos, resultando así la configuración de los cuatro mapas de nivel piezométrico (2 por periodo).

4.3.3 Configuración de la evolución de los niveles de agua subterránea

Para configurar la evolución de los niveles de agua subterránea, a partir de los hidrogramas se eligieron las sondas con una profundidad mayor o igual a 100 m que presentaron las mayores fluctuaciones en ambos periodos. Posteriormente, los resultados se interpolaron en el software Terrset con el módulo *Interpol*, con el siguiente proceso.

Primero se digitalizó el área del valle del Acuífero en el software ArcGIS, este archivo de formato vectorial se convirtió de líneas a puntos con la caja de herramientas *Arc Tool Box-Data Management Tools-Features-Feature vertices to points*. Después se agregaron a estos puntos recién creados sus coordenadas en X y en Y con la herramienta *Add XY coordinates* con la proyección UTM14N. A la base de datos de evolución se agregaron los puntos del valle, juntando ambas tablas en Excel. La tabla se añadió nuevamente al proyecto de ArcGIS con *Arc Tool Box-Conversion Tools-Excel to Table* y desplegando los puntos de multipiezómetros y del valle con *Display XY points*. Se guardó la capa (layer) en formato shape (shp).

Para interpolar los datos de evolución, como se hizo referencia anteriormente, se utilizó el software Terrset. Primero se importó el archivo vectorial, del formato shp. al formato de Idrisi. Una vez abierto, se creó un archivo de liga en formato vlx. para poder relacionar el identificador de cada punto con un campo de la base de datos en este caso evolución. Se desplegó un archivo en formato vectorial de puntos.

Se generaron los contornos con el módulo *Contour*, en ambos casos se asignó un valor de 3 metros. El resultado es un archivo de tipo vectorial con las líneas que marcan el contorno de las áreas interpoladas en el paso anterior. Como el software es solo un acercamiento del resultado real, fue necesario hacer un análisis de las imágenes y en algunos casos digitalizar nuevamente el polígono para que fuera acorde con la topografía de la zona. Posteriormente, se obtuvo el área de cada entidad en m².

4.4 Determinación de la recarga de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca

Para obtener el volumen de roca drenada se utilizaron las áreas de cada polígono y el promedio de la evolución de cada polígono. Ambos datos se multiplicaron y se hizo la sumatoria de todas las entidades. Para obtener el abatimiento promedio del periodo (en ambos periodos el acuífero se abatió en algunas zonas y en otras se recuperó), se sumaron los promedios de evolución y se dividieron entre el área total del Valle (que equivale a la sumatoria de todas las áreas de los polígonos, es decir 1,622,116,861.1 m²).

Después, se obtuvo el abatimiento promedio anual dividiendo el promedio de abatimiento del periodo entre el número de años de cada periodo (entre 12 años para el primer periodo y entre 5 años para el segundo periodo). Para obtener el volumen de agua drenada, se multiplicó el abatimiento promedio anual, por el área total del Acuífero del Valle de Toluca en m² (2,526,554,030 m²) por 0.045 que es el coeficiente adimensional del almacenamiento en la roca y que se obtuvo de la Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero del Valle de Toluca, Estado de México (CONAGUA, 2002). El resultado se convirtió a Mm³ y finalmente, al tener todos los insumos se aplicó la ecuación 6 para obtener la recarga de agua subterránea con el método de balance:

$$E-S=\pm \Delta S \dots\dots\dots(\text{ec.6})$$

Dónde:

- E = Entradas
- S = Salidas
- $\pm \Delta S$ = Cambio de almacenamiento

CAPÍTULO V. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo, se exponen los resultados que se obtuvieron siguiendo los pasos metodológicos del capítulo anterior para estimar la recarga de agua subterránea mediante los métodos de balance hídrico del suelo y el método de balance hidrológico del acuífero. Se sigue el mismo orden de los pasos metodológicos de acuerdo con el esquema general omitiendo el primer paso –“Recopilación de la información”- ya que en el capítulo anterior se hace referencia a las fuentes donde se consiguió la misma.

5.1 Método del balance hídrico de suelo

A continuación, se presenta una tabla resumen (Tabla 5.1) de los resultados obtenidos de cada parámetro para estimar la infiltración eficaz de agua subterránea mediante el balance hídrico del suelo.

Tabla 5.1 Resumen de resultados del método de balance hídrico del suelo

Periodo	1984-1996	2010-2015
Precipitación media anual	825.03 mm	878.68 mm
Temperatura media periodo	13.41°C	13.63°C
Evapotranspiración (E_t_o)	376.77 mm	371 mm
Volumen de escurrimiento	244 mm	285 mm
Infiltración potencial	202.45 m (564 Mm ³)	222 m (614 Mm ³)

5.1.1 Estructuración de los datos climáticos (precipitación y temperatura) para el periodo comprendido entre 1960 y 2015

De este paso metodológico se obtuvieron los archivos de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media para ambos periodos (12 imágenes por variable) ordenados en grupos ráster. Después se hicieron grupos de las imágenes comprendidas en el periodo de lluvias de mayo a octubre de ambos periodos.

5.1.2 Elaboración de los perfiles de precipitación y temperatura

Los gráficos de los perfiles de precipitación y temperatura media de ambos periodos (Figura 5.1 y 5.2) permiten visualizar la relación de las variables climatológicas en el tiempo. Como se observa en los gráficos, los meses con mayor precipitación se presentan entre mayo y octubre. La temperatura también aumenta en esos meses, al presentarse mayor cantidad de agua y mayor temperatura, la evapotranspiración también aumenta.

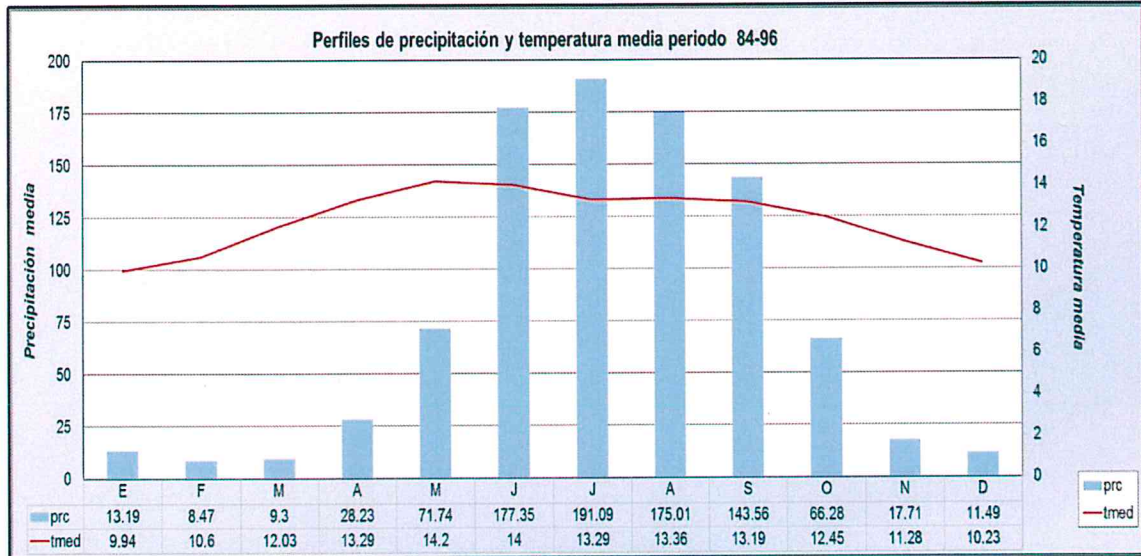


Figura 5.1 Variación temporal de temperatura y precipitación para el periodo 1984-1996

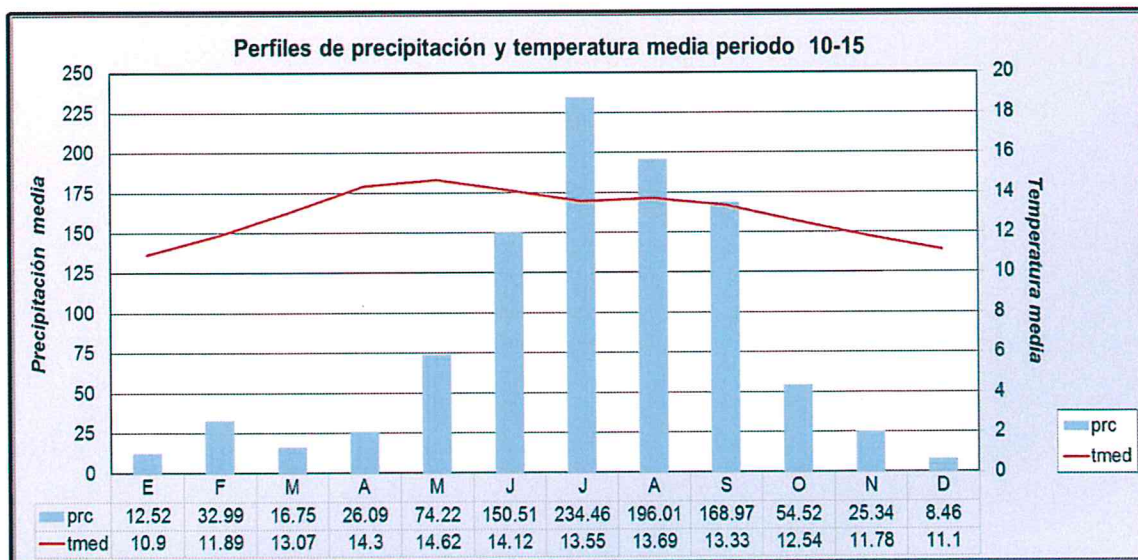


Figura 5.2 Variación temporal de temperatura y precipitación para el periodo 2010-2015

5.1.3 Determinación de los insumos a utilizar

De este paso metodológico se obtuvieron las imágenes de todos los insumos a utilizar y se presentan a continuación:

5.1.3.1 Precipitación media y temperatura media del periodo de lluvias (mayo a octubre) de ambas temporalidades (1984-1996 y 2010-2015)

Se obtuvieron las imágenes de precipitación (Figura 5.3 y Figura 5.4) y temperatura media (Figura 5.5 y Figura 5.6) del periodo de lluvias para ambos periodos. Como se observa en los mapas de precipitación los mayores valores ocurren en las zonas altas del Acuífero del Valle de Toluca, es decir en el Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces con uso de suelo principalmente de bosque. Al pie de monte de las elevaciones se observan los valores intermedios y coincide con el uso de suelo pastizal y la geología de esta porción es principalmente basaltos, andesitas y rocas volcánicas que pertenecen al medio fracturado y, en el centro del Acuífero se tienen los valores más bajos coincidiendo con las áreas urbanas e industriales y uso de suelo urbano y agrícola. La geología de esta zona es principalmente sedimentos lacustres y aluviones que pertenecen al medio acuitardo.

En cuanto a los mapas de temperatura media se observa que las mayores temperaturas coinciden con el clima templado subhúmedo de verano fresco largo y poca oscilación térmica tipo Ganges Cb(w2)(w)(i'') g en el centro del AVT donde también los principales usos de suelo son urbanos y agrícolas. Las menores temperaturas se encuentran en las zonas altas como el Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces donde el clima es frío isotermal con sequía intraestival tipo Ganges E(T)HC(w2)(w)igw'' y templado subhúmedo semifrío de verano fresco largo isotermal tipo Ganges Cb'(w2)(w)ig. En esta zona la precipitación es mayor.

5.1.3.2 Modelo Digital de Elevación

Se obtuvo la imagen del DEM (Figura 5.7) con la cual se trabajó el resto del proyecto donde se observan altitudes que van de los 2600 msnm a los 4680 msnm. La mayor altitud corresponde al Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces y las menores altitudes corresponden al centro del Valle de Toluca y coincide con las zonas urbanas e industriales.

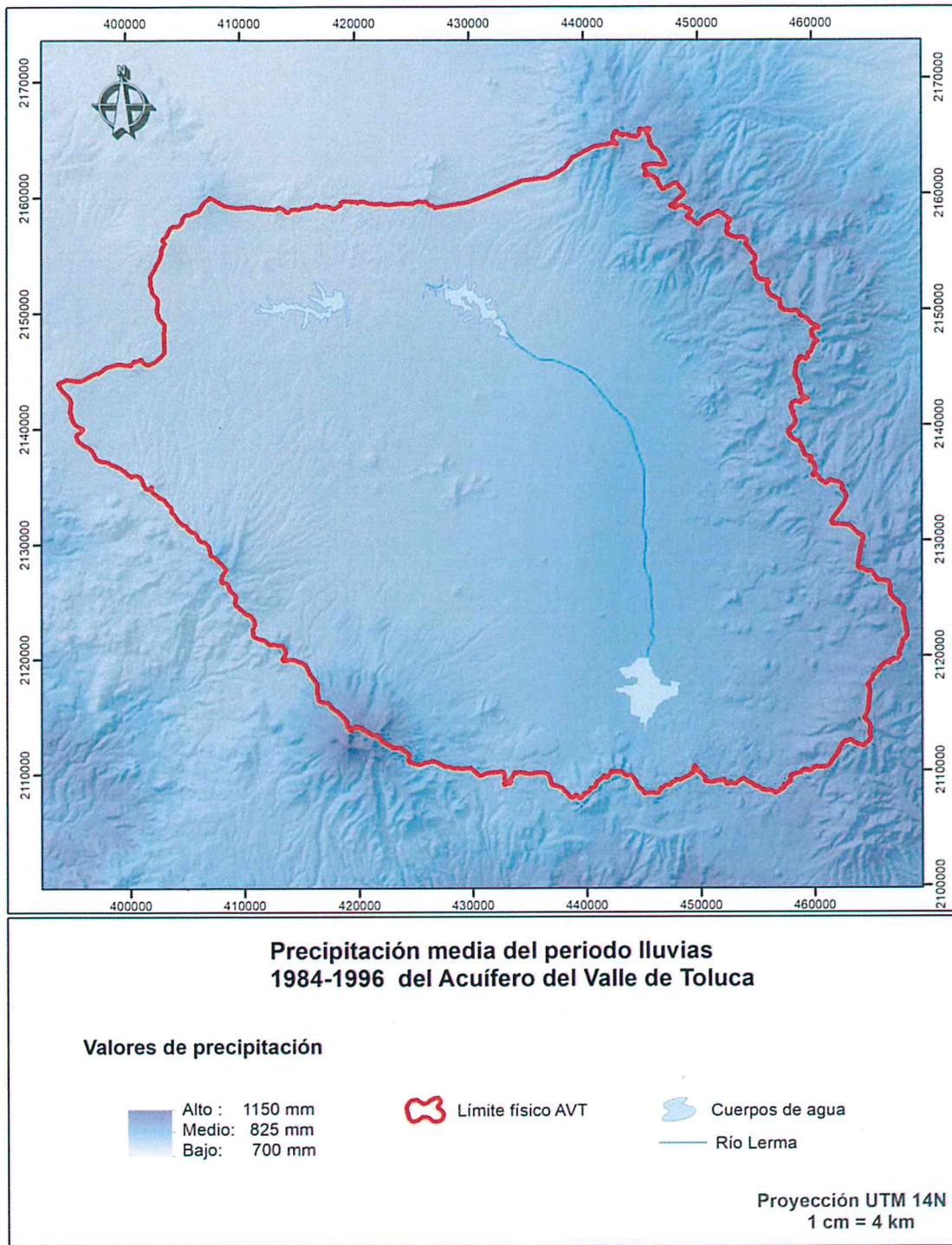


Figura 5.3 Precipitación media del periodo de lluvia en el Acuífero del Valle de Toluca 1984-1996

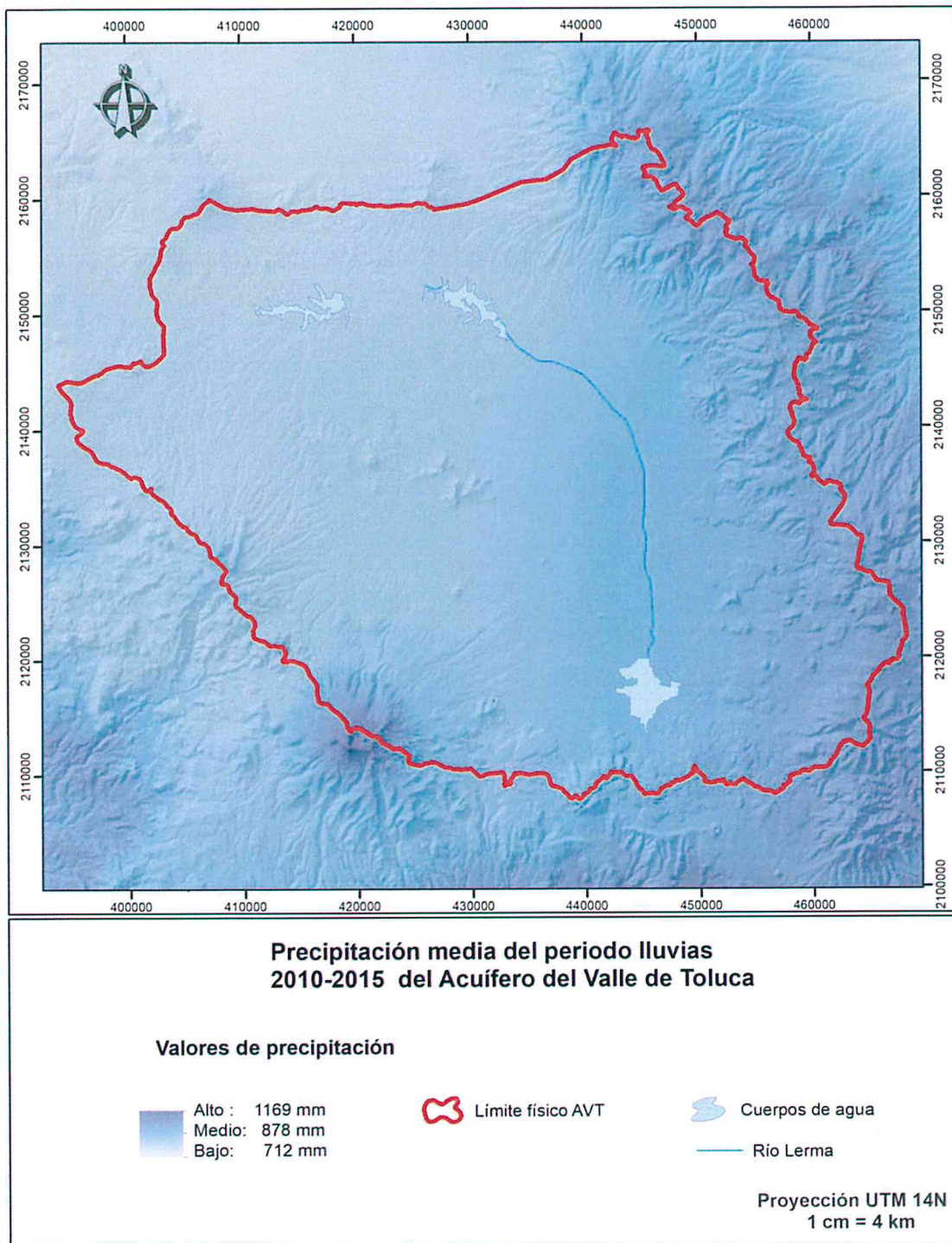


Figura 5.4 Precipitación media del periodo de lluvias en el Acuífero del Valle de Toluca 2010-2015

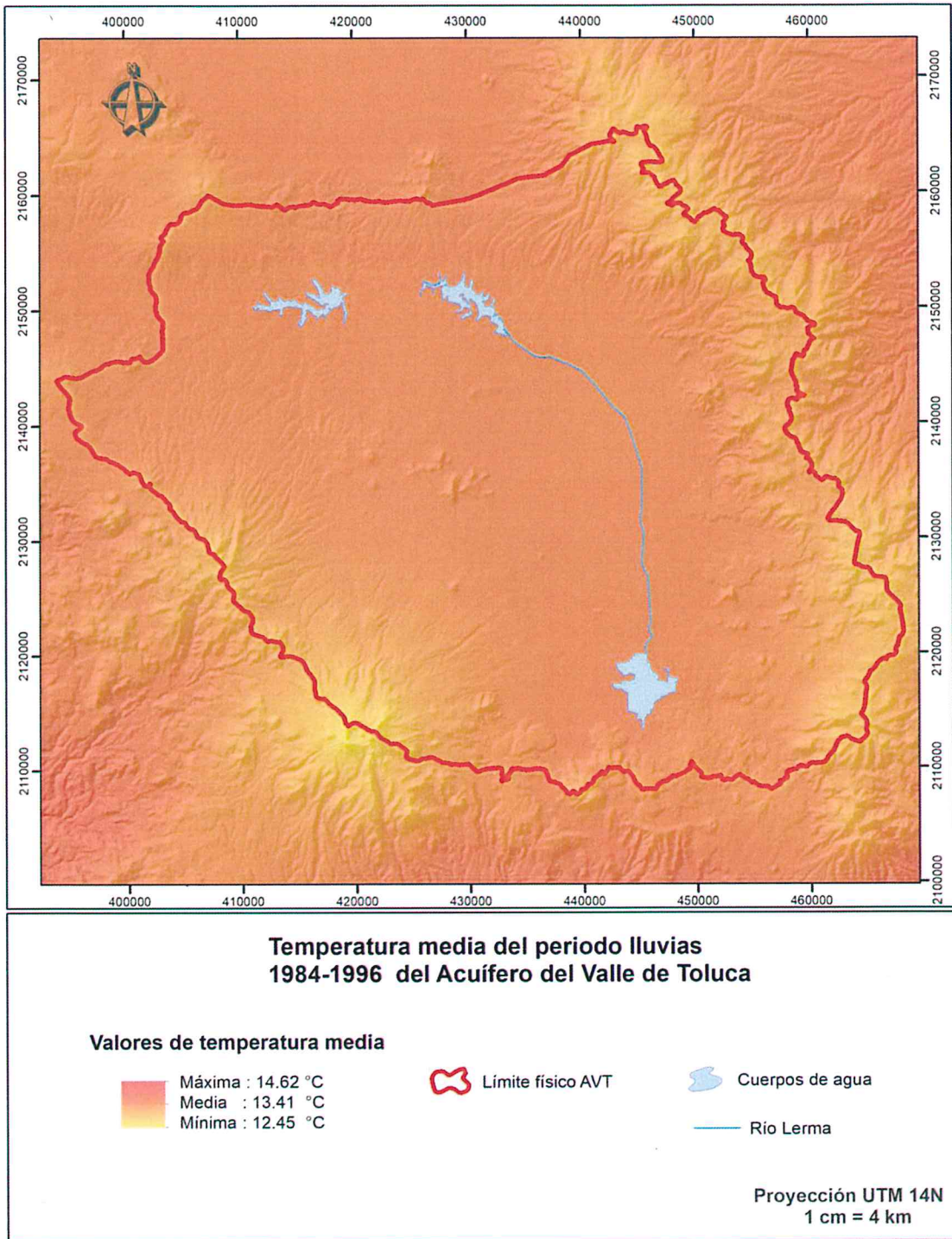


Figura 5.5 Temperatura media del periodo de lluvias en el Acuífero del Valle de Toluca 1984-1996

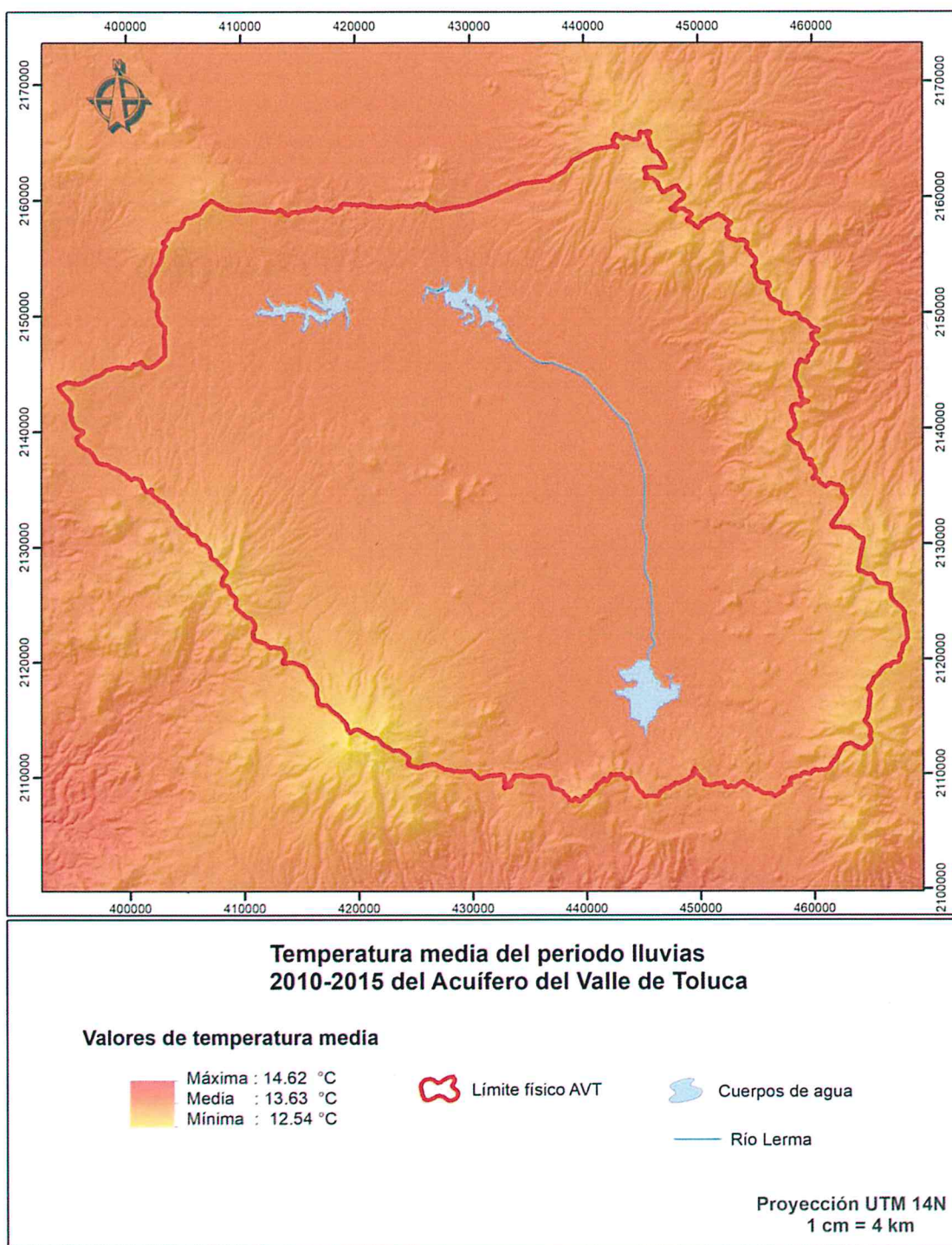


Figura 5.6 Temperatura media del periodo de lluvias en el Acuífero del Valle de Toluca 2010-2015

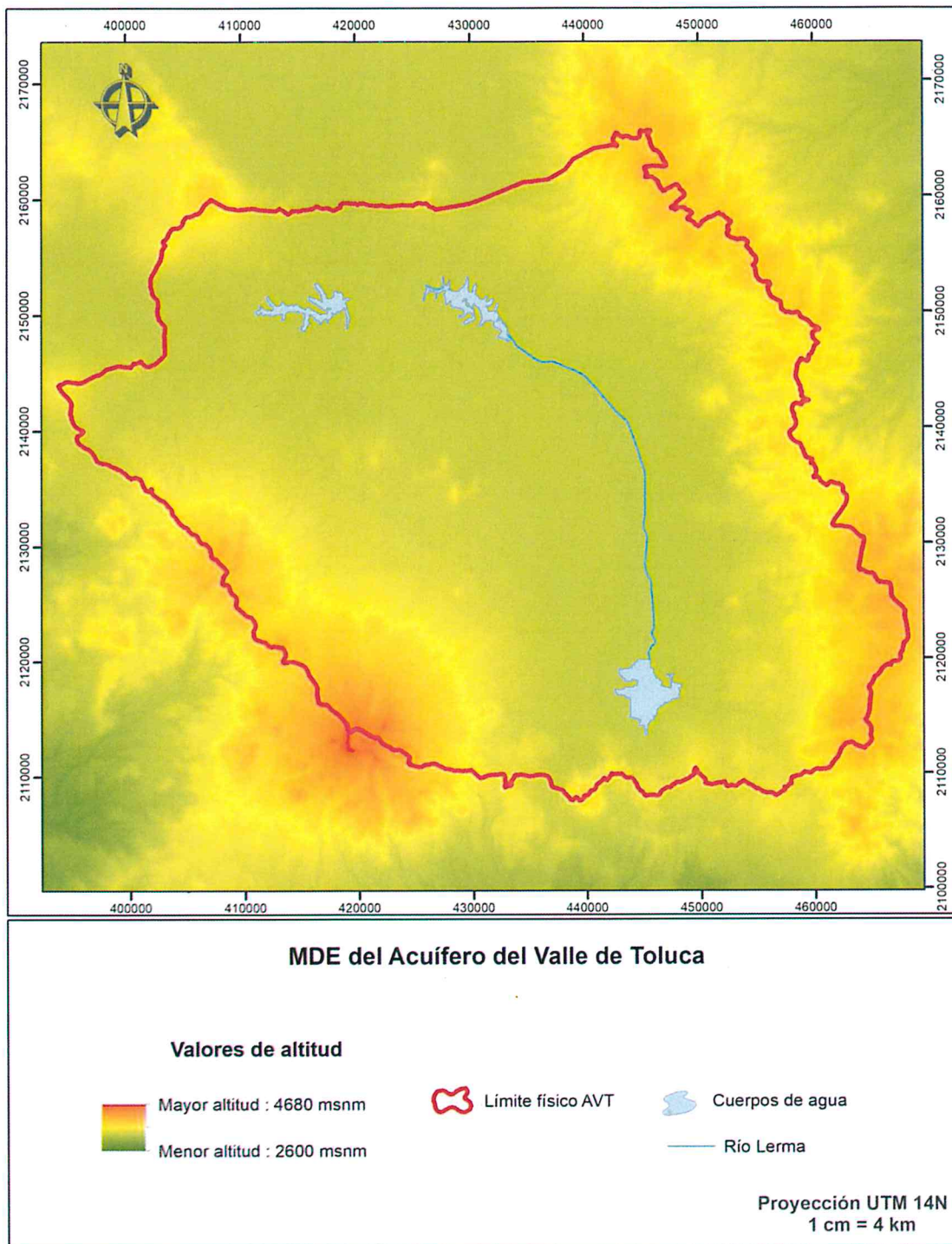


Figura 5.7 Modelo Digital de Elevación del Acuífero del Valle de Toluca

5.1.3.3 Tipo y uso de suelo

Al asignar un nuevo valor de textura a la imagen de tipo de suelo, en función de la permeabilidad del tipo de suelo, se obtuvo como resultado la imagen de textura del suelo del Acuífero del Valle de Toluca (Figura 5.8) donde la textura fina (o suelos impermeables) se concentra principalmente en la zona norte coincide con la geología sedimentaria de limos y la textura gruesa (suelos permeables) con la geología sedimentaria de origen volcánico.

También se obtuvieron las imágenes de uso de suelo para el año 1986 y 2016 (Figuras 5.9 y Figura 5.10). Estas imágenes se analizaron resultando que, en el caso de la imagen del año 1986 hay una incipiente mancha urbana en el centro del acuífero que se expande al Este. El principal uso de suelo en este periodo era agrícola. La porción boscosa se observa en las partes altas y la cantidad de suelo desnudo no es representativo ni siquiera en las laderas del volcán Nevado de Toluca.

En la imagen correspondiente al año 2016, es visible que la porción de suelo desnudo principalmente se ubica en las laderas del volcán Nevado de Toluca, el cultivo se ha extendido principalmente en la porción central, el uso como pastizal se observa en la porción norte de forma dispersa, los bosques principalmente en las zonas altas como el Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces y el uso urbano e industrial al centro del acuífero, ha crecido considerablemente en comparación con el año 1986. Todavía hay muchas localidades dispersas, pero en la porción central se observa una conglomeración que se expande en algunos puntos altos.

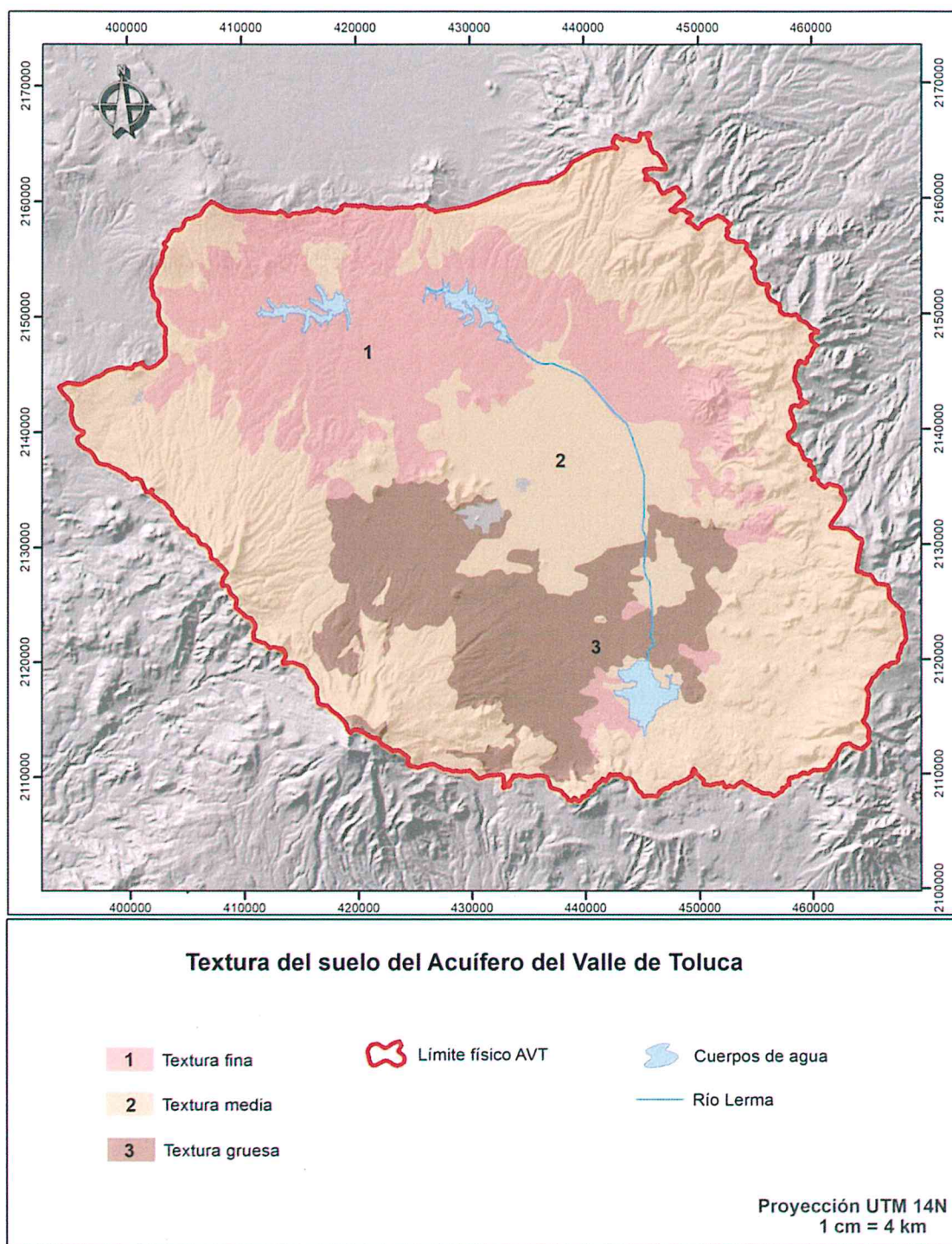


Figura 5.8 Textura del suelo del Acuífero del Valle de Toluca

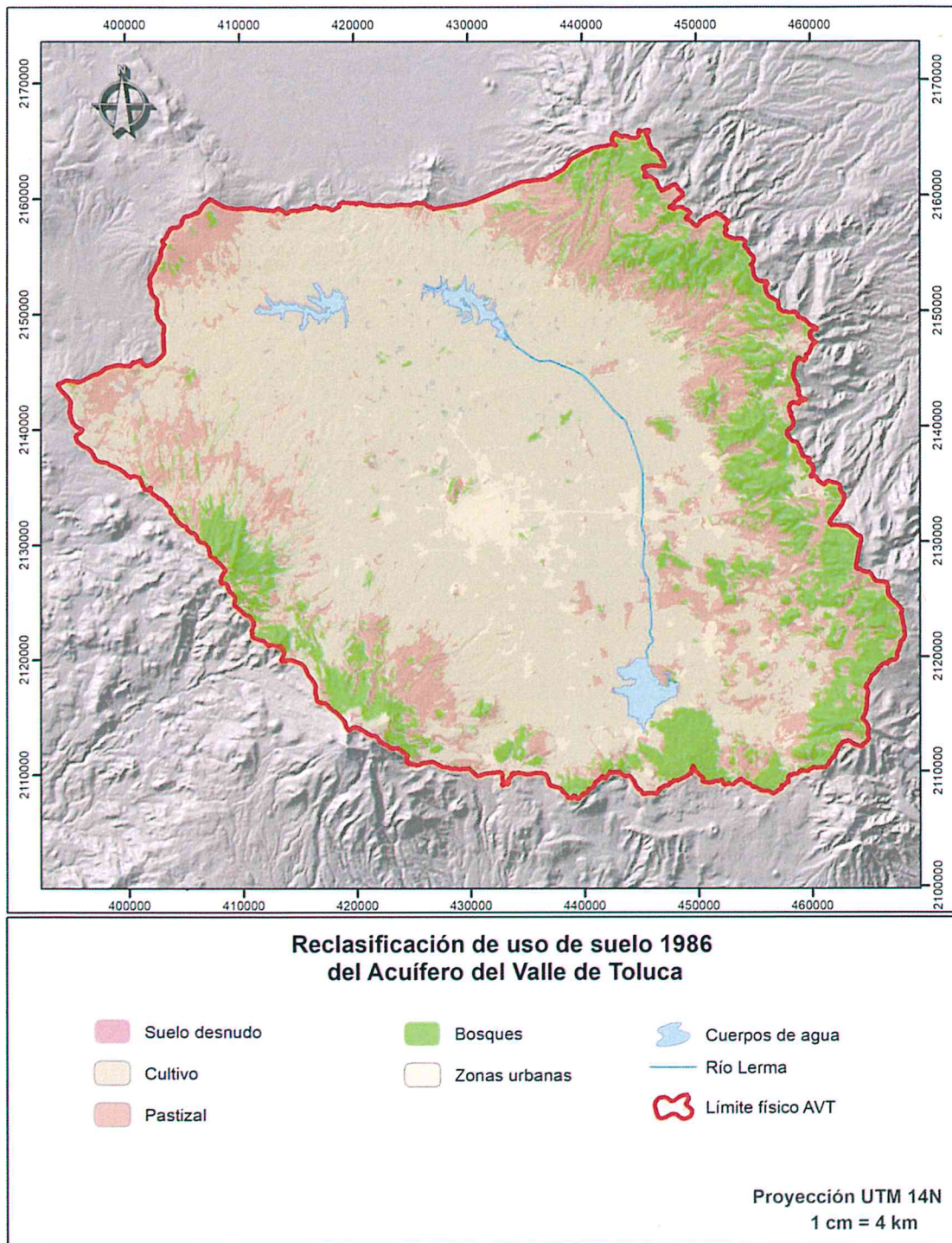


Figura 5.9 Reclasificación de uso de suelo. Año 1986

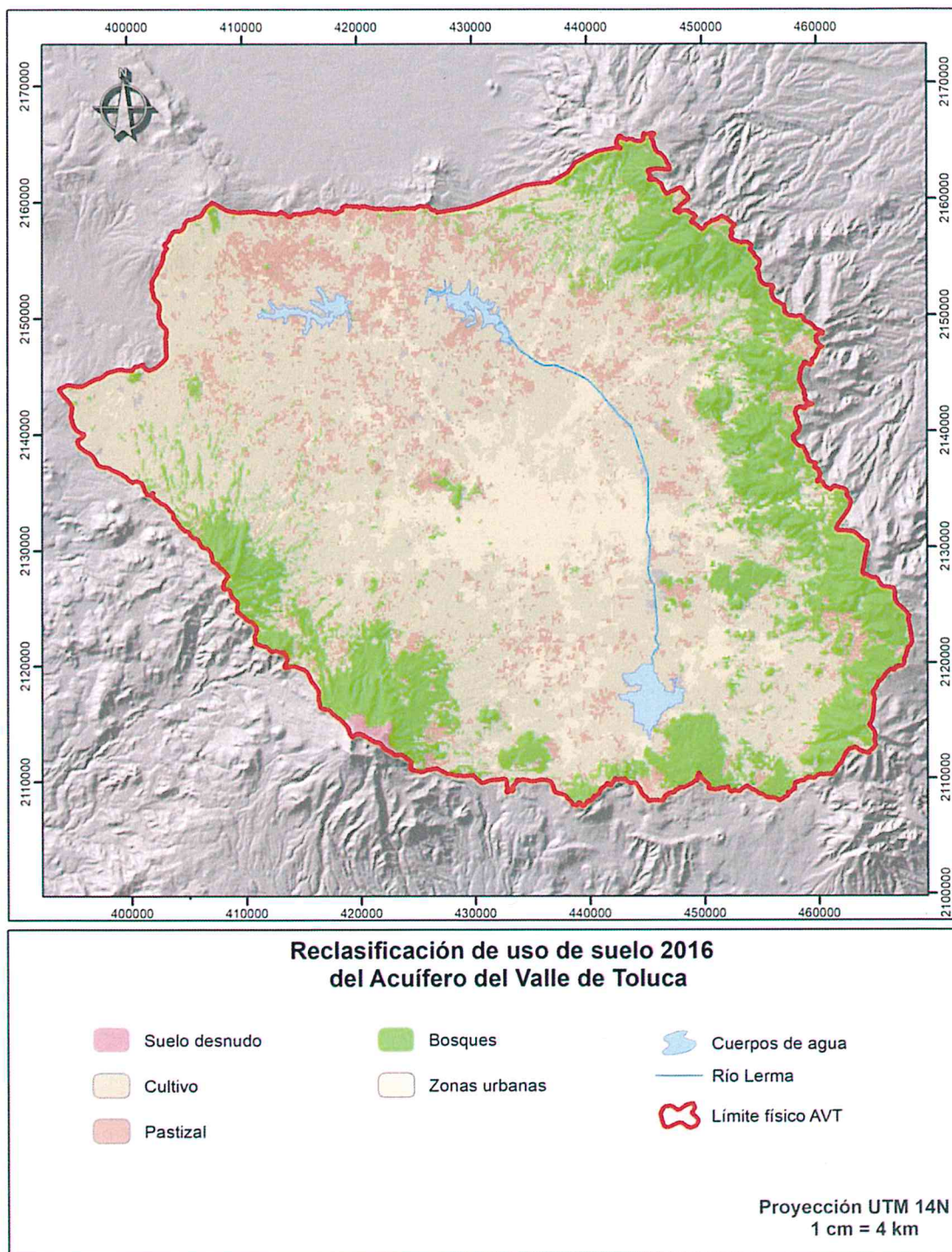


Figura 5.10 Reclasificación de uso de suelo. Año 2016

5.1.3.4 Determinación de la evapotranspiración y el escurrimiento

Al ingresar todos los insumos al módulo *Groundwater Emery* de Terrset se obtuvieron como resultado los mapas de evapotranspiración (Figuras 5.11 y 5.12), escurrimiento (Figuras 5.13 y 5.14) e infiltración potencial (Figuras 5.15 y 5.16). En los mapas de evapotranspiración se observa que los máximos valores se dan en el centro del AVT coincidiendo con las regiones de mayor temperatura, menor altitud, menor precipitación, geología sedimentaria, uso de suelo principalmente urbano y agrícola. Los valores medios se observan al pie de monte de la Sierra de las Cruces y el Nevado de Toluca donde hay precipitación media y los valores más bajos se observan en las zonas con mayor altitud, menor temperatura, marcada influencia de la hidrografía, uso de suelo principalmente de bosque, geología volcánica en su mayoría y corresponde al medio fracturado.

En cuanto a los mapas de escurrimiento, en el periodo comprendido entre 1984 y 1996 se observa que el escurrimiento es impactado por la topografía de la zona, siendo mayor en las zonas con las mayores pendientes, es decir el Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces, donde la textura del suelo es principalmente media, la geología es de origen volcánico, pertenece al medio hidrogeológico fracturado y hay gran influencia de la hidrografía.

En el mapa del periodo 2010-2015 los valores medios y altos se observan al pie de monte de las zonas altas, donde los usos de suelo son principalmente bosque y pastizal, la geología es andesítica y basáltica en su mayoría, el medio es fracturado. Los menores valores se ubican en la porción central del AVT coincidiendo con la planicie, el uso de suelo urbano y agrícola principalmente, así como menor cantidad de precipitación.

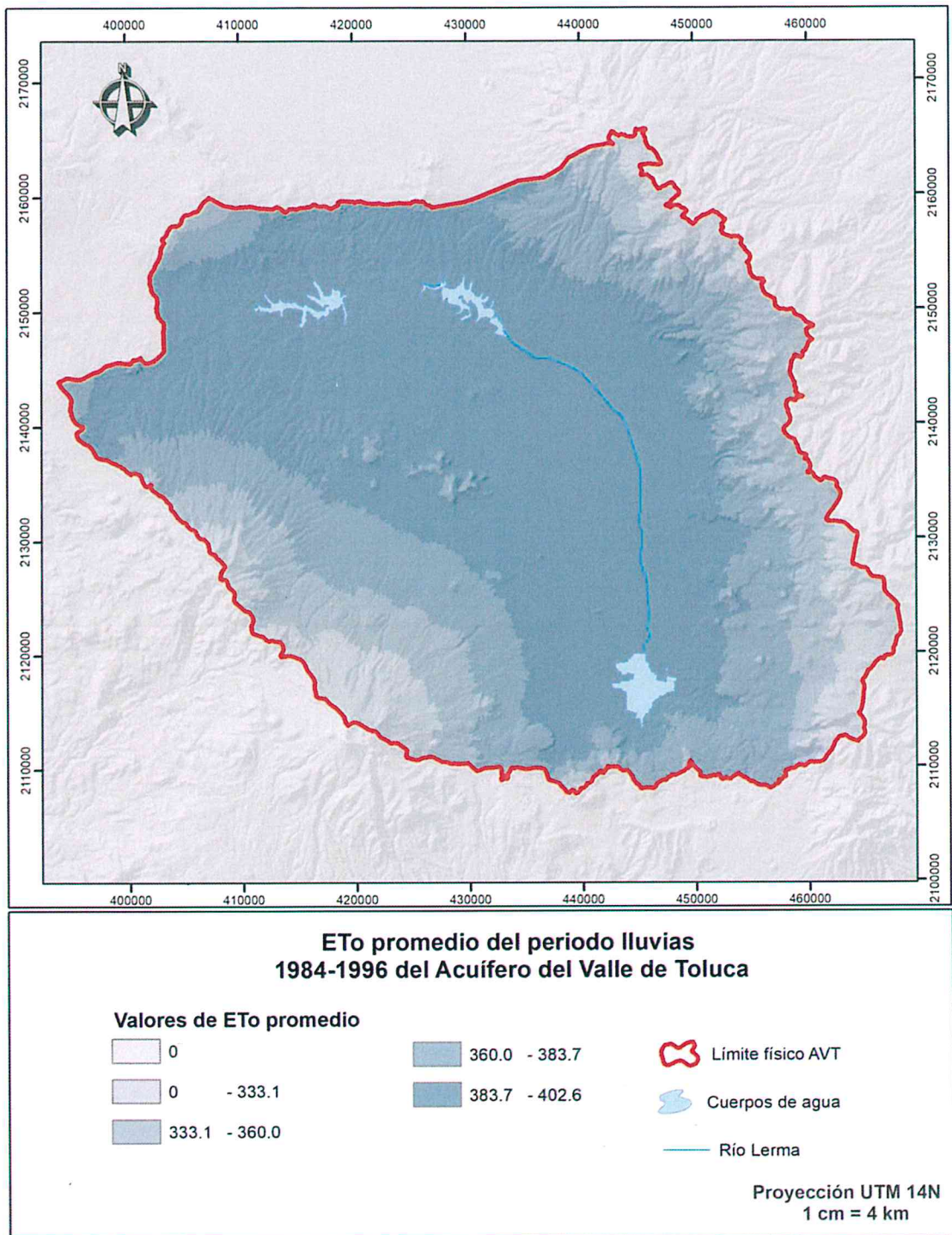


Figura 5.11 E_{to} promedio del periodo de lluvias 1984-1996. Acuífero del Valle de Toluca

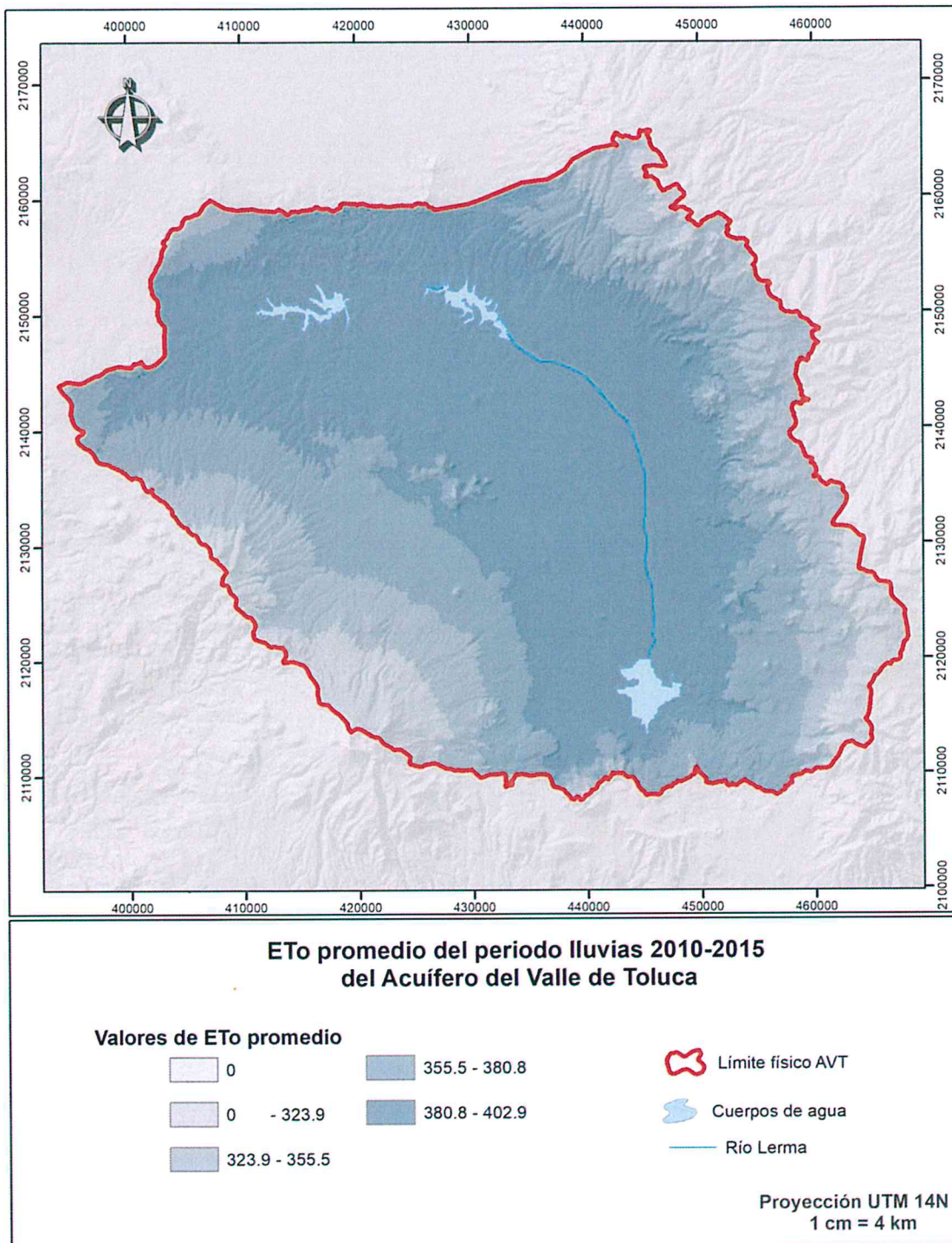


Figura 5.12 E_{to} promedio del periodo de lluvias 2010-2015. Acuífero del Valle de Toluca

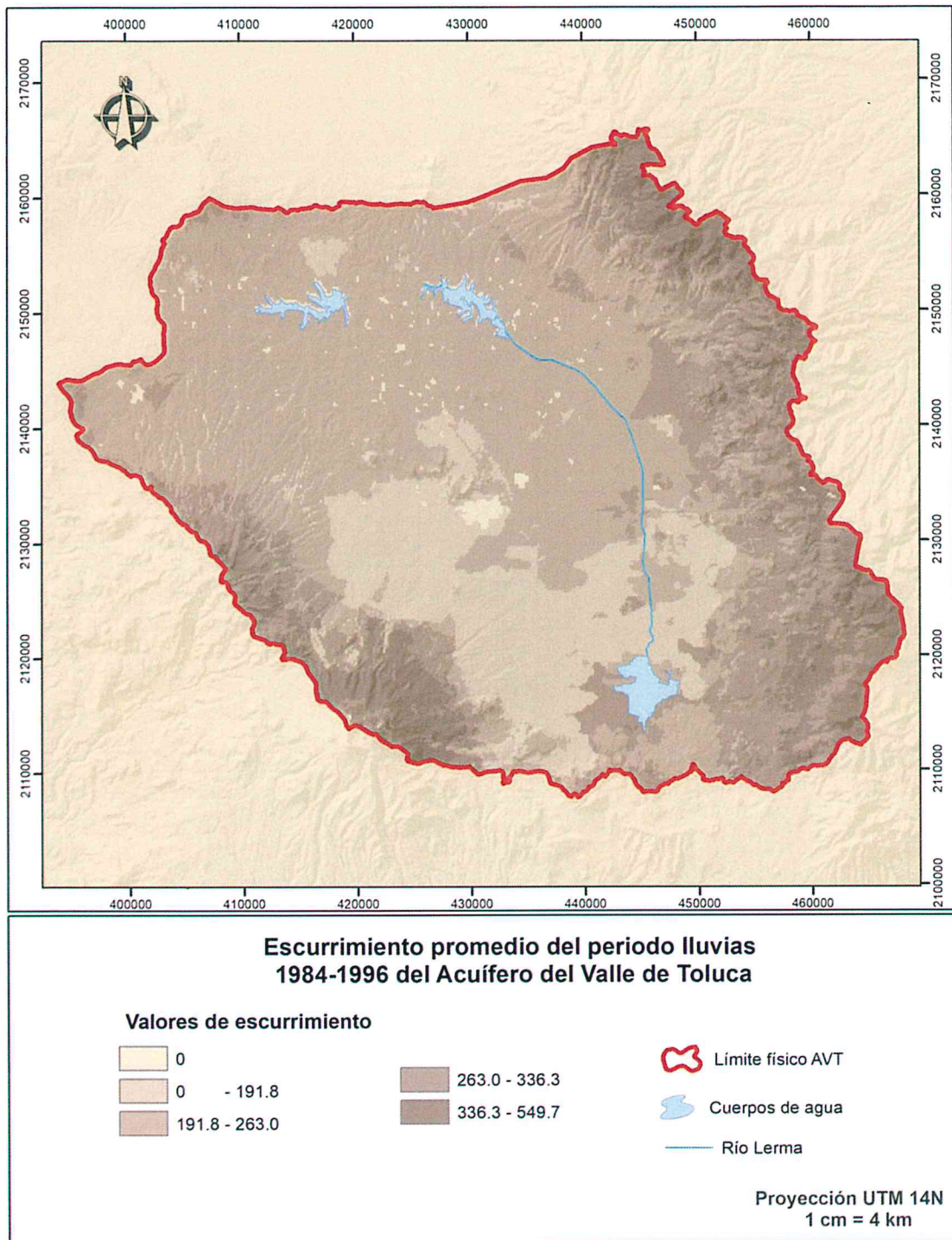


Figura 5.13 Escurrecimiento promedio del periodo de lluvias 1984-1996. Acuífero del Valle de Toluca

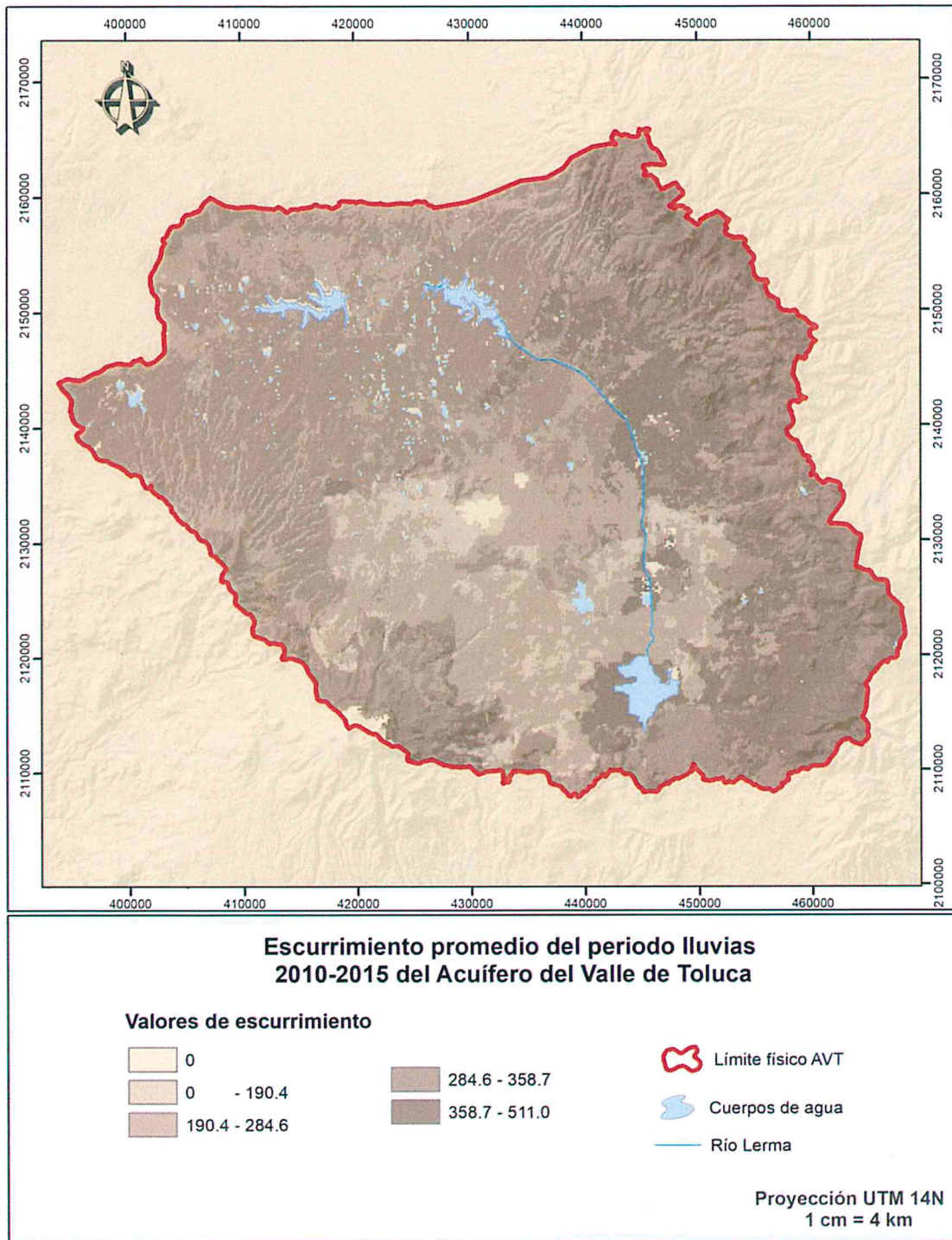


Figura 5.14 Escurrecimiento promedio del periodo de lluvias 2010-2015. Acuífero del Valle de Toluca

5.1.3.5 Determinación de la infiltración potencial del Acuífero del Valle de Toluca

Ingresando todos los insumos del Módulo *Groundwater Emery* de Terrset se obtuvo la Infiltración potencial del acuífero del Valle de Toluca y se obtuvo su promedio con el módulo *Extract-Average* en Terrset detallados en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resultados de infiltración potencial de ambos periodos

Periodo	Infiltración potencial
1984-1996	204.23 mm (564 Mm ³)
2010-2015	222 mm (614 Mm ³)

Finalmente, se elaboraron los mapas de infiltración potencial de recarga de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca. En el mapa del periodo comprendido entre 1984 y 1996 se observa que los mayores valores de infiltración se dan en las zonas altas del Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces, donde el medio es fracturado, la geología es principalmente de origen volcánico, el uso de suelo es bosque, hay mayor precipitación, menor temperatura, menor evapotranspiración.

En el mapa del periodo 2010-2015, hay un cambio notorio, los valores más altos se observan en el Volcán Nevado de Toluca y la porción sur de la Sierra de las Cruces. Los valores bajos coinciden con las mayores temperaturas, menores precipitaciones, mayor evapotranspiración, uso de suelo urbano y agrícola, y geología sedimentaria.

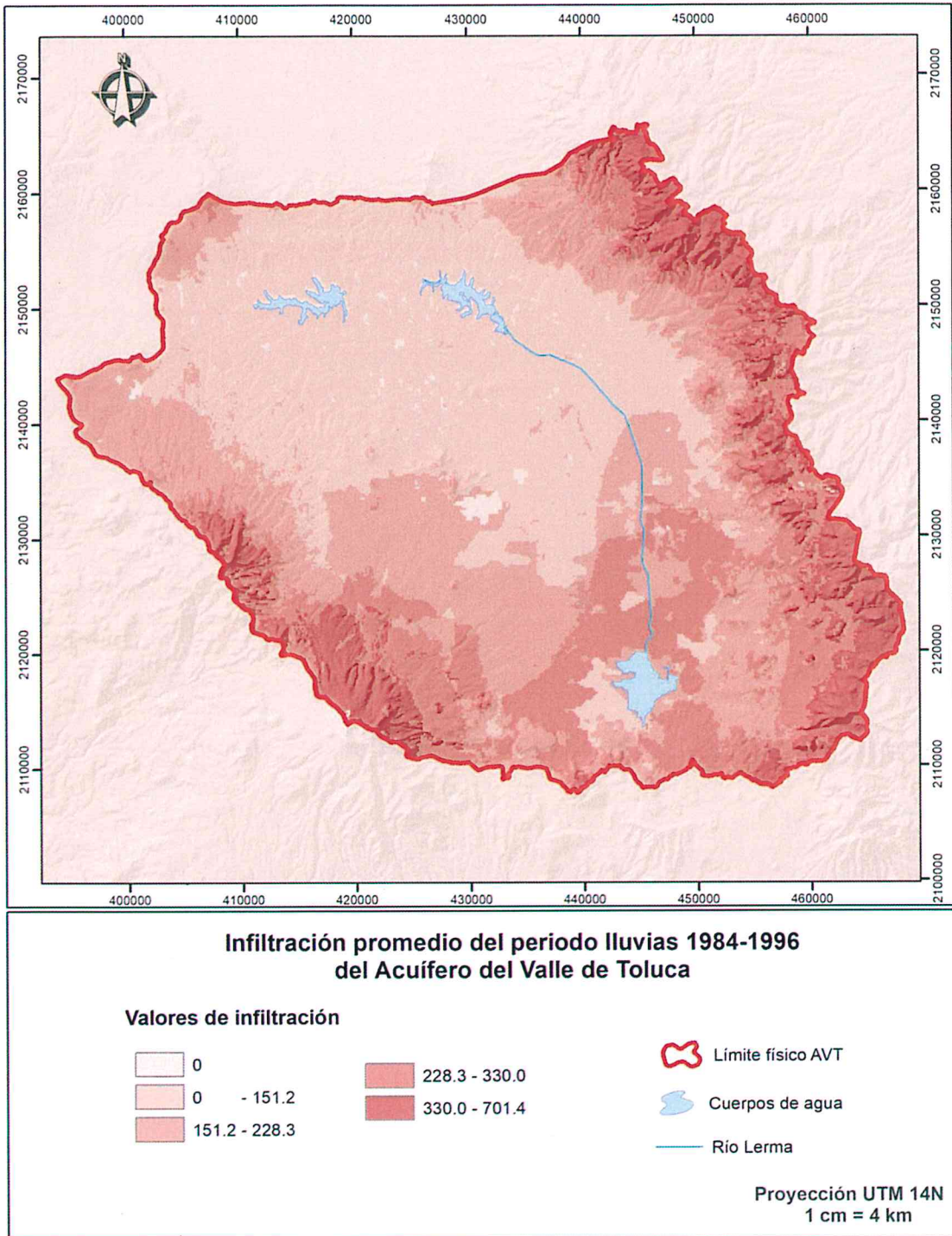


Figura 5.15 Infiltración potencial promedio del periodo de lluvias 1984-1996. Acuífero del Valle de Toluca

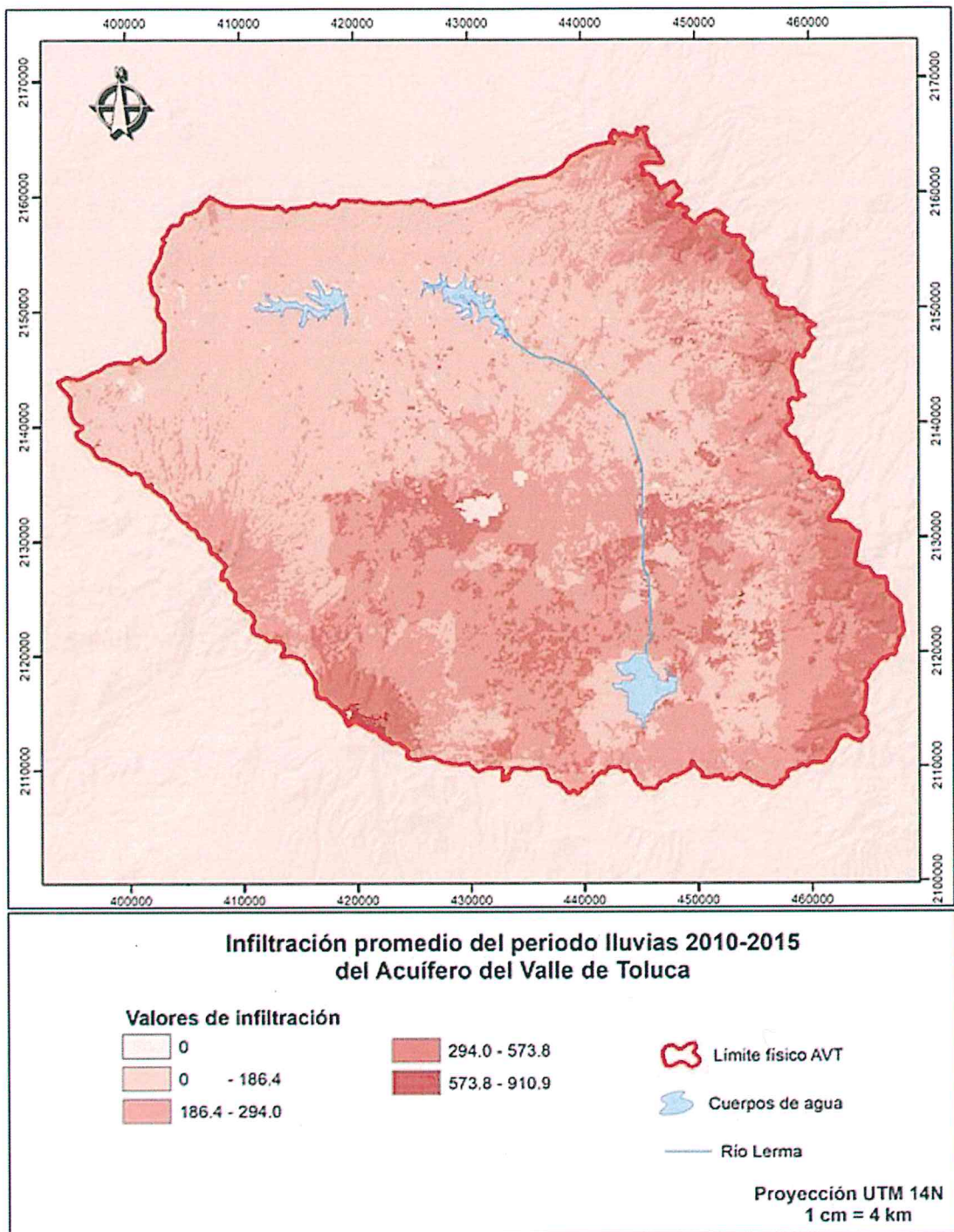


Figura 5.16 Infiltración potencial promedio del periodo de lluvias 2010-2015. Acuífero del Valle de Toluca

5.2 Método del balance hídrico del acuífero

En la siguiente (Tabla 5.3) se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos de cada parámetro para estimar la recarga de agua subterránea mediante el balance hídrico del acuífero.

Tabla 5.3 Resumen de los resultados obtenidos del método de balance hídrico del acuífero

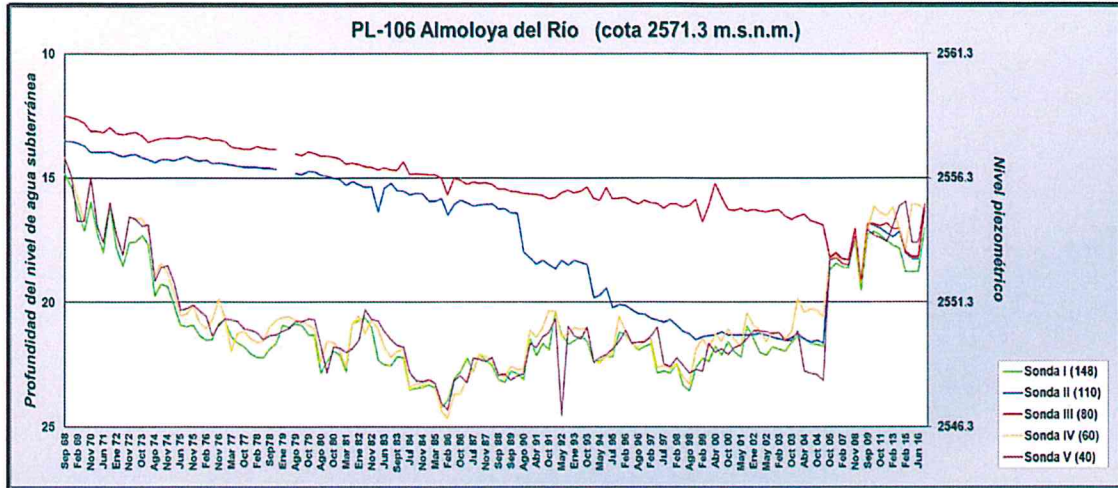
Periodo	Vol. de roca drenada (m ³)	Abatimiento promedio del periodo (m)	Abatimiento promedio anual (m)	Vol. de agua Drenada (Mm ³)	± ΔS (Mm ³)	Extracción del periodo (Mm ³)	Recarga (Mm ³)
1984-1996	2,463,061,834	1.5	0.12	319,698,442	14.3	422.34	407.94
2010-2015	2,345,260,885	1.4	0.28	730,579,711	32.87	474.36	441.49

5.2.1 Elaboración del diagnóstico de funcionamiento de pozos, hidrogramas históricos, anuales y configuración de la profundidad de los niveles piezométricos

A partir de la actualización de los datos piezométricos hasta el año 2017, se elaboraron los hidrogramas históricos (Figura 5.17) y anuales (Figuras 5.18 y 5.19) de cada multipiezómetro. Se elaboraron los hidrogramas históricos para visualizar un panorama general. Posteriormente se realizaron a nivel anual para homologar los intervalos ya que hubo décadas con más mediciones que otras. Finalmente, se acotaron los periodos seleccionados con los multipiezómetros que podrían aportar información relevante, primero de forma histórica y luego con mayor detalle de forma anual.

Los hidrogramas históricos permitieron observar el panorama general de la dinámica de los niveles piezométricos, desde su establecimiento hasta la fecha, después se eligió un intervalo, tomando como criterio el momento en que los hidrogramas presentaron menor fluctuación de los niveles. El intervalo de tiempo que se seleccionó para este trabajo es el periodo comprendido entre los años 1984-1996 y 2010-2015 y varios multipiezómetros funcionaban en esa temporalidad, lo que representó mayor número de datos disponibles.

A continuación, se muestra un ejemplo para el multipiezómetro 106 Almoloya del Río histórico y anual.



5.17 Ejemplo de la elaboración del hidrograma histórico del multipiezómetro 106-Almoloya del Río

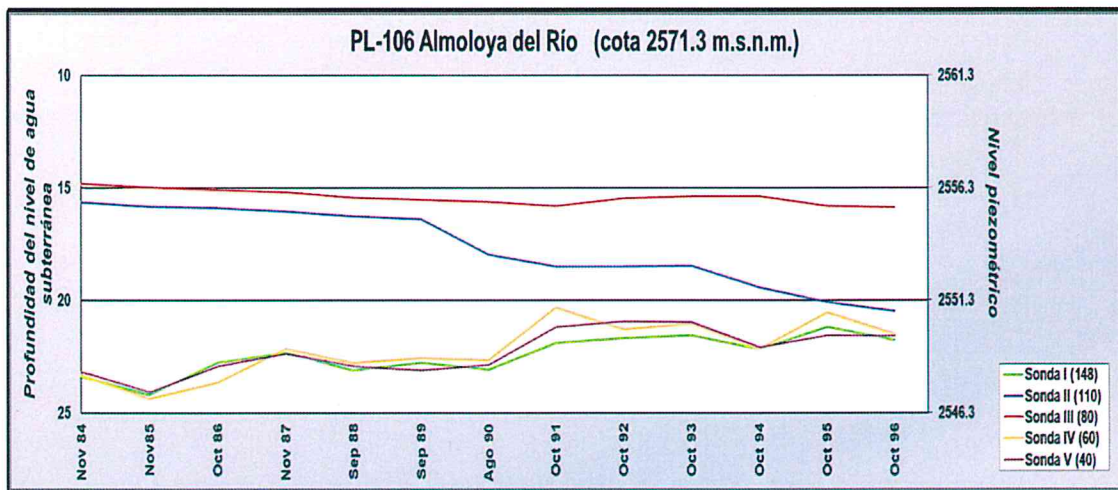


Figura 5.18 Ejemplo de la elaboración del hidrograma anual (periodo 1984-1996) del multipiezómetro 106-Almoloya del Río

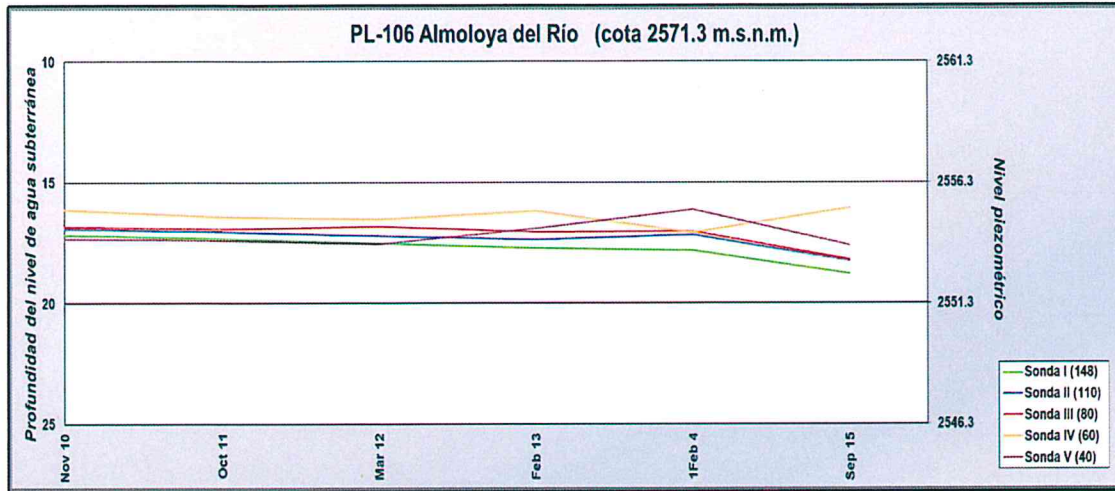


Figura 5.19 Ejemplo de la elaboración del hidrograma anual (periodo 2010-2015) del multipiezómetro 106-Almoloya del Río

5.2.2 Diagnóstico de funcionamiento

A partir de los hidrogramas actualizados se realizó el diagnóstico de funcionamiento de cada multipiezómetro (Figura 5.20). La tabla se encuentra en el apartado de Anexos y contiene un identificador, el número de multipiezómetro, sus coordenadas en X y Y, su altitud (Z) y el diagnóstico de su funcionamiento. El diagnóstico arrojó como resultado que, de los 53 multipiezómetros evaluados, 36 funcionan desde su instalación hasta la actualidad, es decir, de acuerdo con los criterios para determinar su funcionamiento, cuentan con mediciones continuas en la mayoría de sus sondas para todo el periodo comprendido entre 1970 hasta el año 2017; 9 multipiezómetros funcionan parcialmente (esto debido a que en algunos años no se cuenta con mediciones por causa de abejas o la inaccesibilidad a los mismos) y, finalmente, 8 de ellos no funcionan y la causa principal es la destrucción del pozo, mangueras tapadas o mangueras quemadas).

5.2.3 Configuración de la profundidad de los niveles de agua subterránea

Se elaboró una tabla que incluye los valores que se utilizaron para realizar la configuración de los niveles de agua subterránea. Las tablas para ambos periodos se encuentran en el apartado de Anexos del presente proyecto. Las tablas incluyen número de multipiezómetro, nombre del multipiezómetro, sus coordenadas en X y Y, su altitud (Z), nivel piezométrico inicial de cada periodo (NI), el nivel piezométrico final (NF) de cada periodo, y la

evolución en la profundidad del nivel para cada periodo (E). Los niveles piezométricos y la evolución se obtuvieron como se señaló en los pasos metodológicos 4.3.2 y 4.3.3. A partir de la interpolación manual con el método de triangulación se obtuvieron cuatro mapas de configuración de los niveles del agua subterránea (un mapa inicial y un mapa final de cada periodo).

En el mapa de nivel piezométrico inicial de 1984 (Figura 5.21) se observa que el flujo se dirige hacia el centro coincidiendo con los pozos de explotación para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y del corredor industrial y al este, hacia el Río Lerma, coincidiendo con la ubicación de la batería del Sistema Lerma. En el mapa de nivel piezométrico final 1996, se observan cambios mínimos en la configuración y el flujo (Figura 5.22).

En el mapa de nivel piezométrico inicial de 2010 (Figura 5.23) se observan cambios en la configuración en comparación con el periodo anterior, ya que al centro convergen las líneas de flujo, esto está ligado a la zona de bombeo de los pozos de explotación para la Zona Metropolitana e Industrial del Valle de Toluca. El mapa de nivel final de 2015 (Figura 5.24) sigue la misma tendencia, ya que las líneas de flujo convergen en el centro del Valle, coincidiendo con los pozos de bombeo. Hay que considerar que para este periodo al margen del río Lerma se observan algunos cambios.

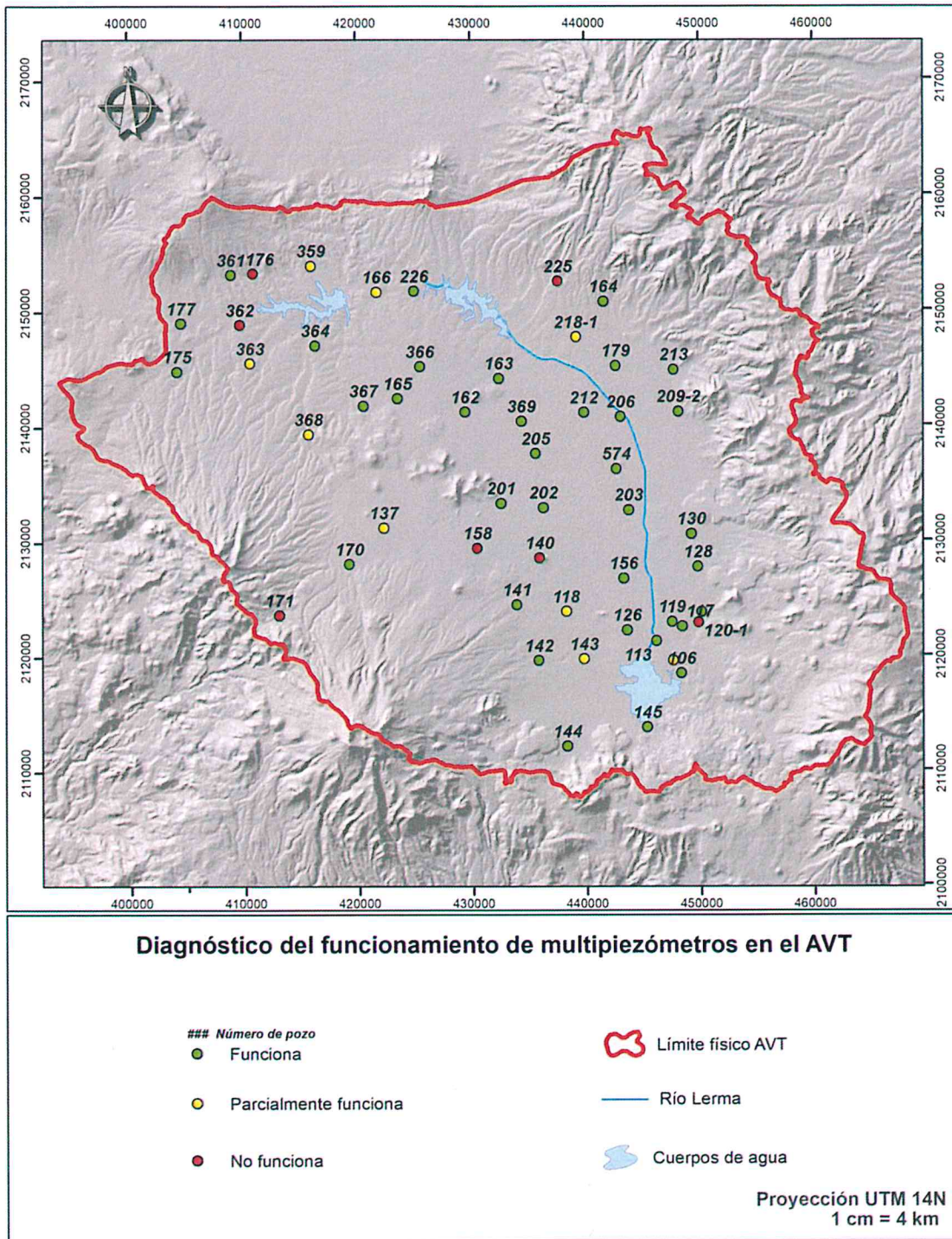


Figura 5.20 Diagnóstico del funcionamiento de los multipiezómetros del AVT para el periodo 1970-2017

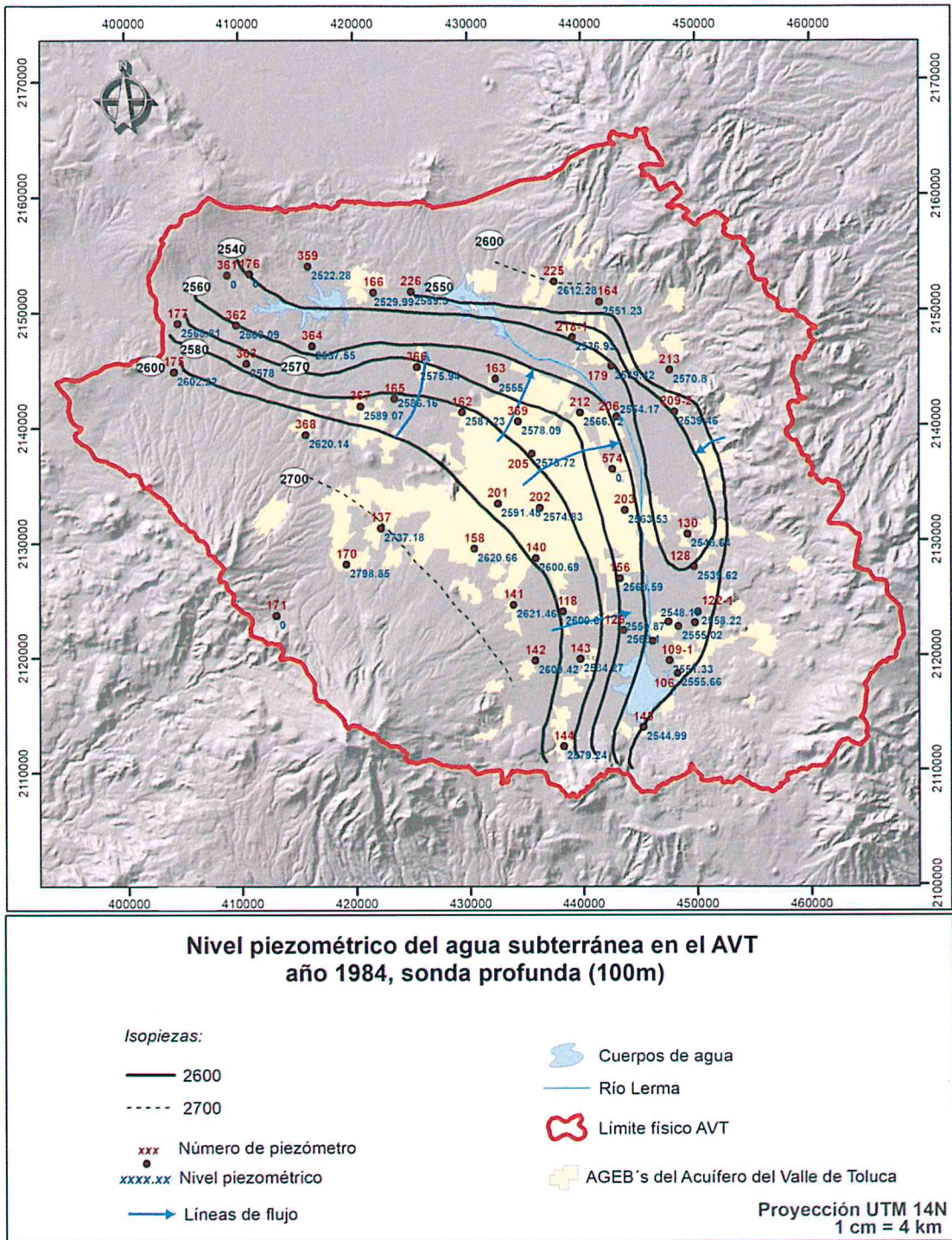


Figura 5.21 Nivel piezométrico inicial año 1984 Acuífero del Valle de Toluca

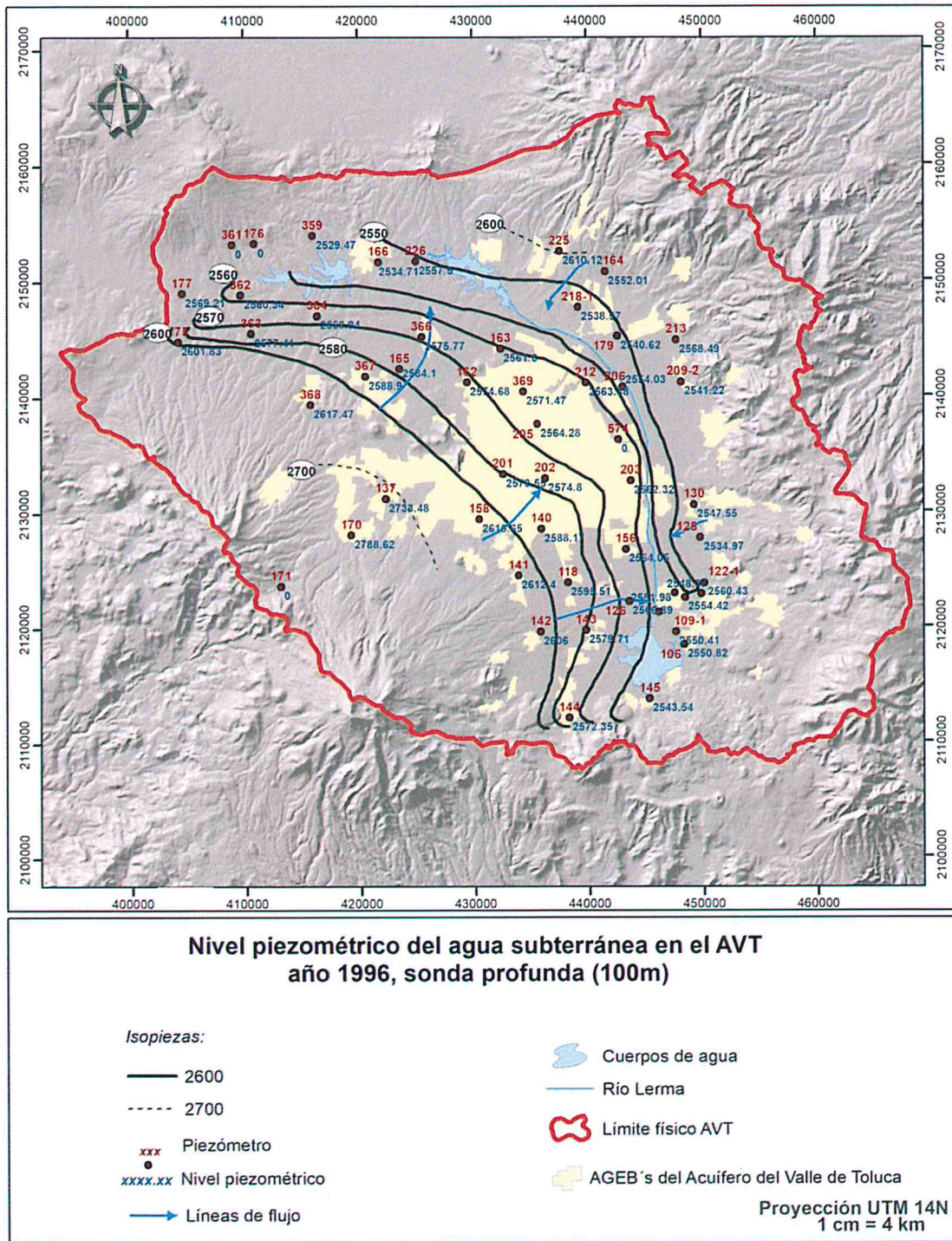


Figura 5.22 Nivel piezométrico final año 1996 Acuífero del Valle de Toluca

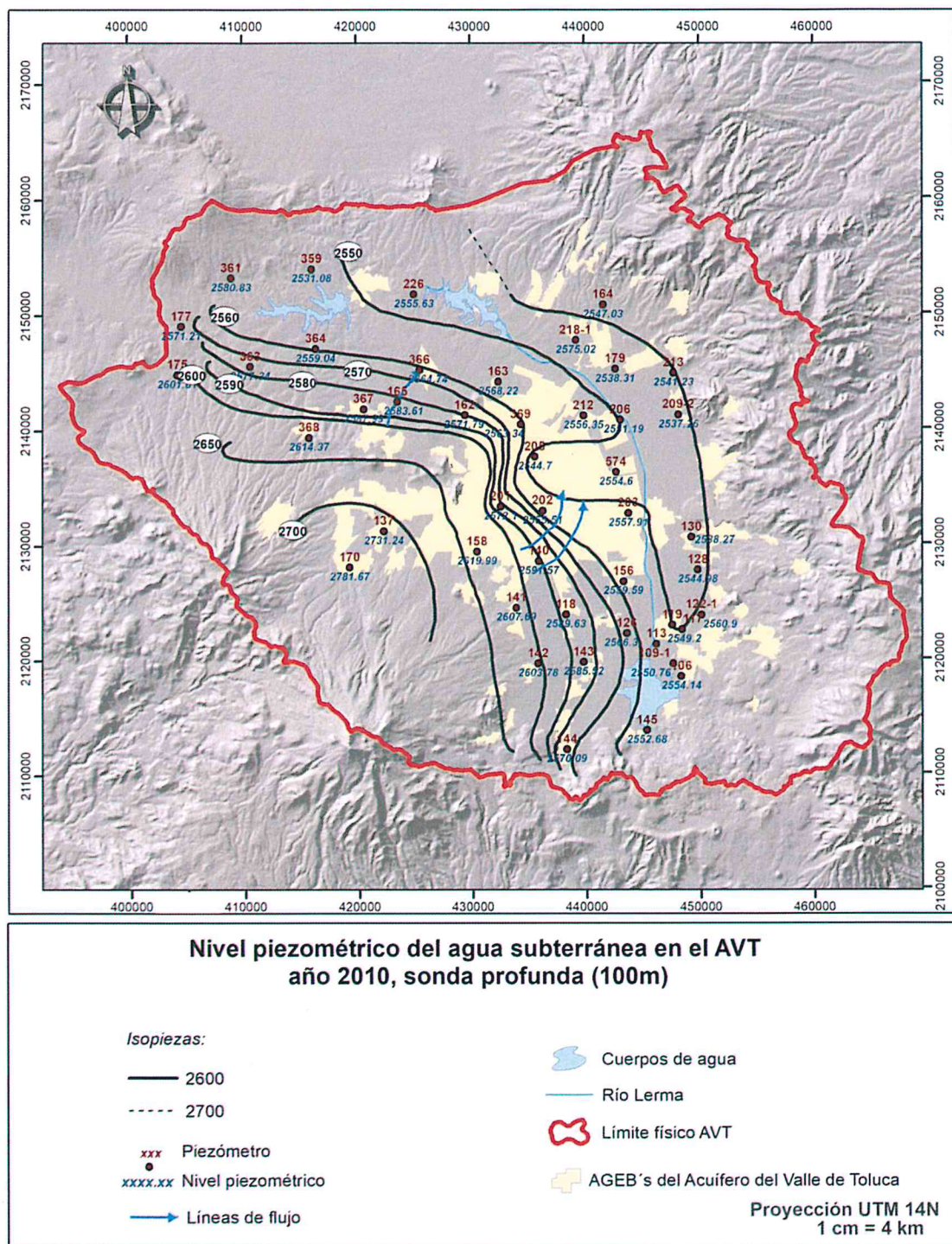


Figura 5.23 Nivel piezométrico inicial año 2010 Acuífero del Valle de Toluca

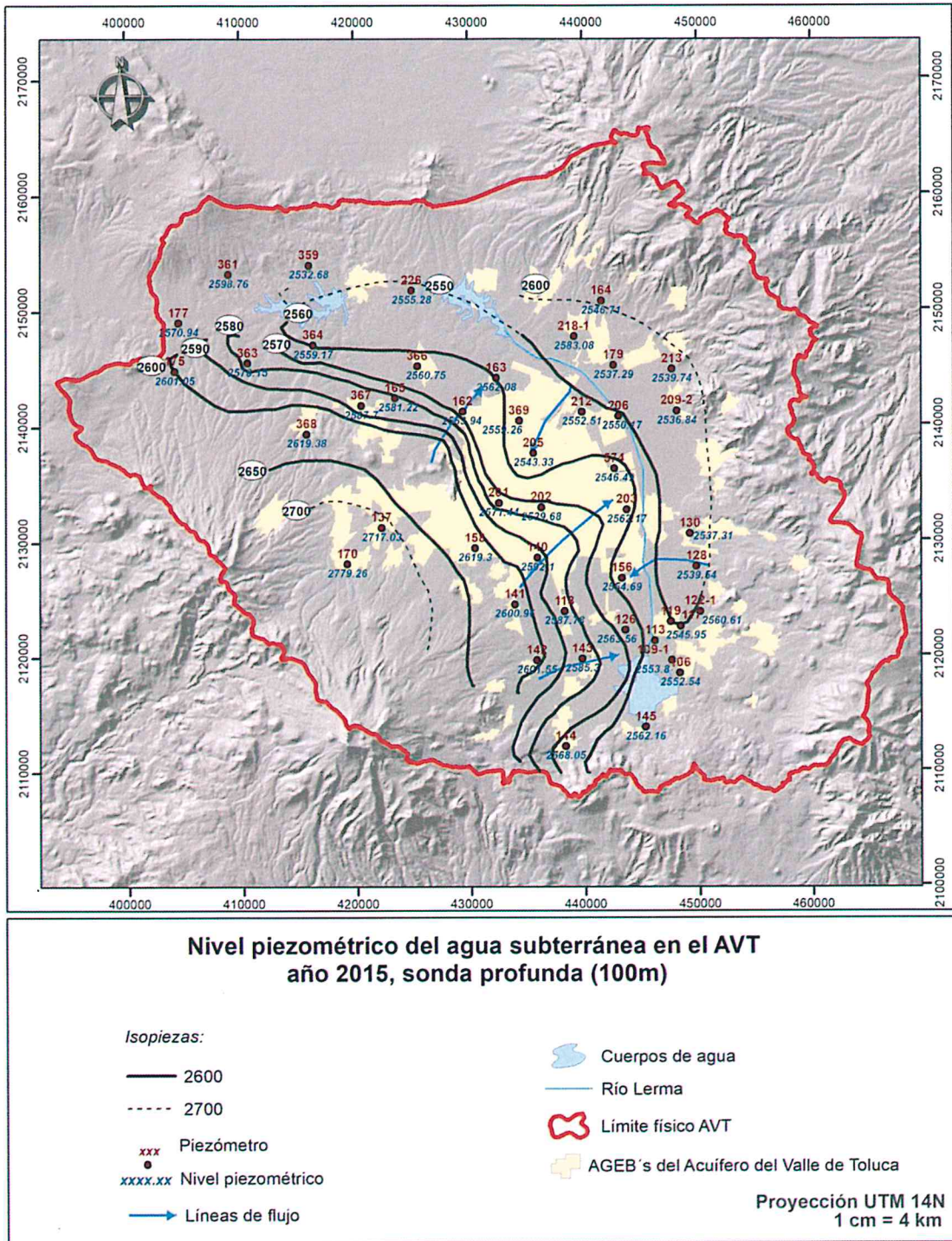


Figura 5.24 Nivel piezométrico final año 2015 Acuífero del Valle de Toluca

5.2.4 Configuración de la evolución de los niveles de agua subterránea

Para la elaboración de los mapas de evolución de los niveles de agua subterránea se utilizó la tabla que se encuentra en el apartado de Anexos, de acuerdo como se señala en la metodología (paso 4.3.3). De la interpolación digital y de los ajustes manuales se elaboraron las tablas con el área en m² de cada polígono, su promedio de abatimiento o recuperación del nivel en m y el volumen de roca drenada en m³. También se obtuvo el polígono del Valle y se calculó su área de 1,622,116,861.1 m². A partir de estas tablas (5.4 y 5.5), se elaboraron los mapas de promedio de abatimiento o recuperación de ambos periodos (Figura 5.25 y 5.26).

Tabla 5.4 Configuración de los niveles de agua subterránea 1984-1996

Id	Área del polígono (m ²)	Promedio de variación del nivel piezométrico (m)	Volumen de roca drenada (m ³)
1	1,249,916.82	-7.095	-8,868,159.84
2	8,319,234.53	-5.3	-44,091,943.04
3	5,981,795.83	-4.36	-26,080,629.81
4	74,086,874.20	-3.3475	-248,005,811.41
5	13,455,148.66	-2.5	-33,637,871.65
6	1,576,614.32	-2.115	-3,334,539.29
7	1,472,817.08	-1.38	-2,032,487.57
8	5,259,704.14	-1.37	-7,205,794.67
9	21,324,775.70	-1.28	-27,295,712.89
10	6,802,028.91	1.015	6,904,059.34
11	3,045,521.45	1.105	3,365,301.20
12	4,366,937.81	1.4	6,113,712.93
13	8,943,997.90	2.08	18,603,515.63
14	4,223,277.78	2.155	9,101,163.63
15	20,089,840.50	2.335	46,909,777.57
16	277,701,739.59	3.045	845,601,797.06
17	1,802,638.88	3.5	6,309,236.11
18	73,357,518.39	4.222	309,715,442.67

Continuación:

Id	Área del polígono (m ²)	Promedio de variación del nivel piezométrico (m)	Volumen de roca drenada (m ³)
19	673,077.44	4.325	2,911,059.93
20	631,291.73	4.42	2,790,309.47
21	983,170.96	5.945	5,844,951.39
22	4,850,023.68	6.5	31,525,153.98
23	3,443,697.23	6.5	22,384,032.05
24	101,710,692.56	6.543	665,493,061.42
25	1,446,103.50	8.285	11,980,967.57
26	2,733,444.47	9.115	24,915,346.42
27	20,261,687.61	9.353	189,507,564.23
28	23,687,218.85	10	236,872,188.50
29	3,905,937.27	11.22	43,824,616.17
30	5,946,110.21	11.465	68,172,153.62
31	7,076,917.23	11.76	83,224,546.63
32	911,707,106.20	0.243	221,544,826.80
	Σ 1,622,116,861.1		Σ 2,463,061,834.2

En el mapa del periodo comprendido entre 1984-1996 (Figura 5.25) se observan zonas con recuperación de los niveles y otras zonas con descenso de los mismos. Las zonas con mayor recuperación se ubicaron principalmente al Noroeste, al Norte del municipio de Almoloya de Juárez y en su frontera con el municipio de Ixtlahuaca, en el municipio de Oztolotepec y una porción al Sureste del valle en el municipio de Capulhuac.

En cuanto a las zonas que presentaron los mayores descensos del primer periodo, se ubicaron principalmente en la mancha urbana de Toluca, Metepec y Zinacantepec. Las zonas intermedias que presentan una tendencia mayor al descenso que a la recuperación coinciden con la zona urbana que comprende los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Mexicalcingo, Chapultepec, Calimaya, San Antonio la Isla, Atizapán y Almoloya del Río.

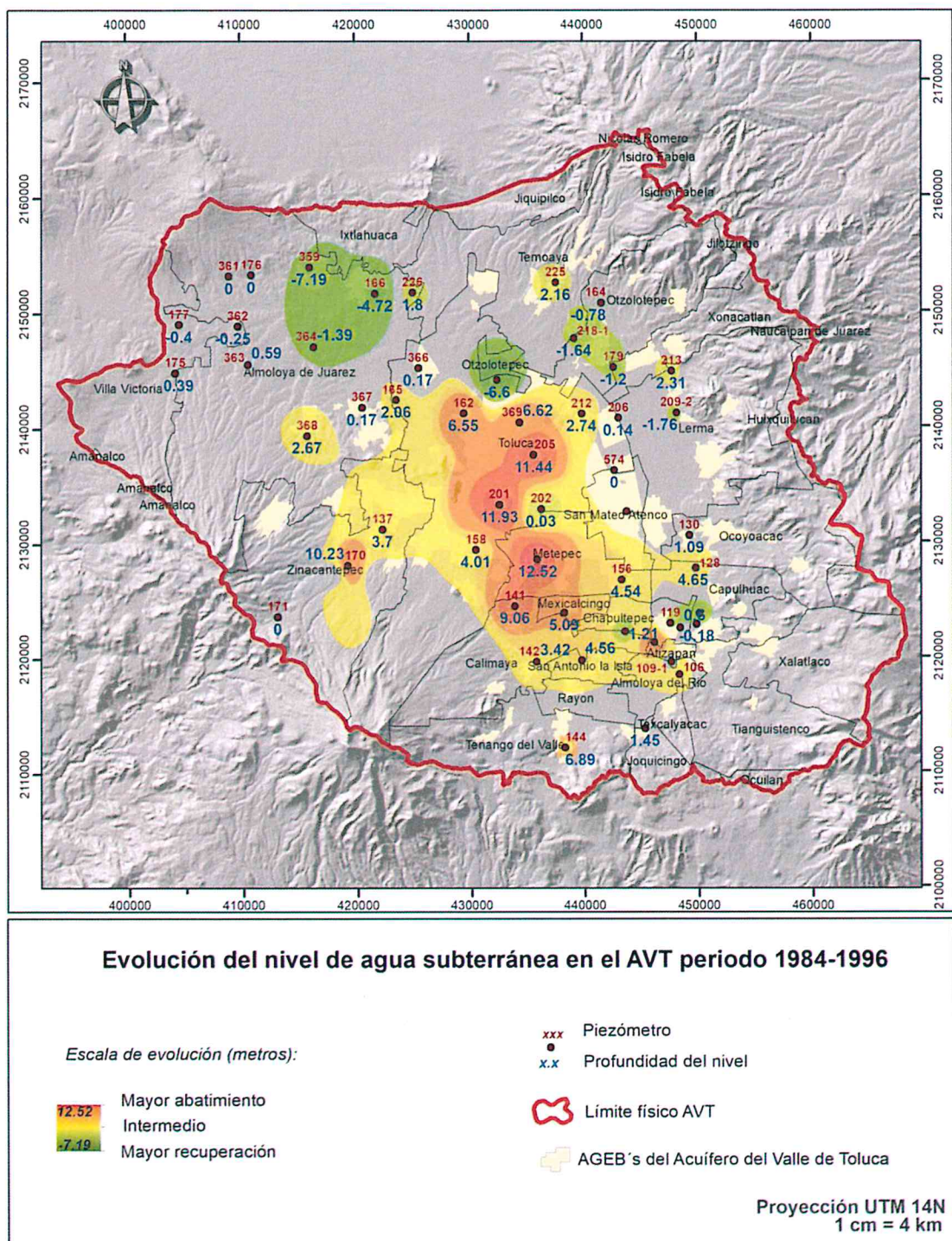


Figura 5.25 Evolución de los niveles de agua subterránea periodo 1984-1996 Acuífero del Valle de Toluca

Del segundo periodo se obtuvo la tabla 5.5:

Tabla 5.5 Configuración de los niveles de agua subterránea 2010-2015

Id	Área del polígono (m ²)	Promedio de variación del nivel piezométrico (m)	Volumen de roca drenada (m ³)
1	1,379,613.76	-7.74000	-10,678,210.57
2	6,355,678.02	-7.03000	-44,680,416.51
3	10,289,384.93	-4.50000	-46,302,232.20
4	1,919,506.04	-4.50000	-8,637,777.21
5	11,436,687.79	-4.00500	-45,803,934.60
6	3,633,098.95	-3.63000	-13,188,149.21
7	23,833,289.01	-2.43400	-58,010,225.45
8	15,300,463.58	-2.00000	-30,600,927.17
9	105,380,582.27	-1.69667	-178,795,651.01
10	18,437,320.54	2.41000	44,433,942.51
11	814,333.96	3.12500	2,544,793.63
12	25,243,628.03	3.54667	89,530,734.93
13	7,328,246.52	4.22000	30,925,200.33
14	16,781,250.09	4.50000	75,515,625.42
15	185,359,583.44	4.70143	871,454,735.70
16	6,251,087.38	6.36500	39,788,171.18
17	29,216,708.62	6.66000	194,583,279.41
18	12,642,491.82	7.50000	94,818,688.69
19	29,310,959.77	7.70300	225,782,323.11
20	7,973,398.32	10.50000	83,720,682.38
21	5,631,930.97	10.50000	59,135,275.18
22	7,708,865.47	13.10500	101,024,682.11
23	5,036,955.57	13.50000	67,998,900.22
24	3,468,404.18	15.41500	53,465,450.51
25	1,081,383,392	0.69100	747,235,923.87
	Σ 1,622,116,861.1	Σ 76.90643	Σ 2,345,260,885.2

En el mapa del periodo comprendido entre 2010-2015 (Figura 5.26), se observan zonas con recuperación de los niveles y otras zonas con descenso de los mismos. Las zonas con mayor recuperación se ubicaron principalmente al Norte en el municipio de Almoloya de Juárez, en el municipio de Oztolotepec y su frontera con el municipio de Temoaya y una porción al Sureste del valle en los municipios de Texcalyacac, Almoloya del Río y Atizapán.

En cuanto a las zonas que presentaron los mayores descensos del segundo periodo, se ubicaron principalmente en la mancha urbana de Toluca, Metepec y Zinacantepec, incrementando sus áreas con respecto al periodo anterior y en la parte Oeste del municipio de Lerma y el Norte de San Mateo Atenco. Las zonas intermedias que presentan una tendencia mayor al descenso que a la recuperación coinciden con la zona urbana que comprende los municipios de Calimaya, Chapultepec y parte del municipio de Ocoyoacac pero en menor proporción en comparación con el periodo anterior.

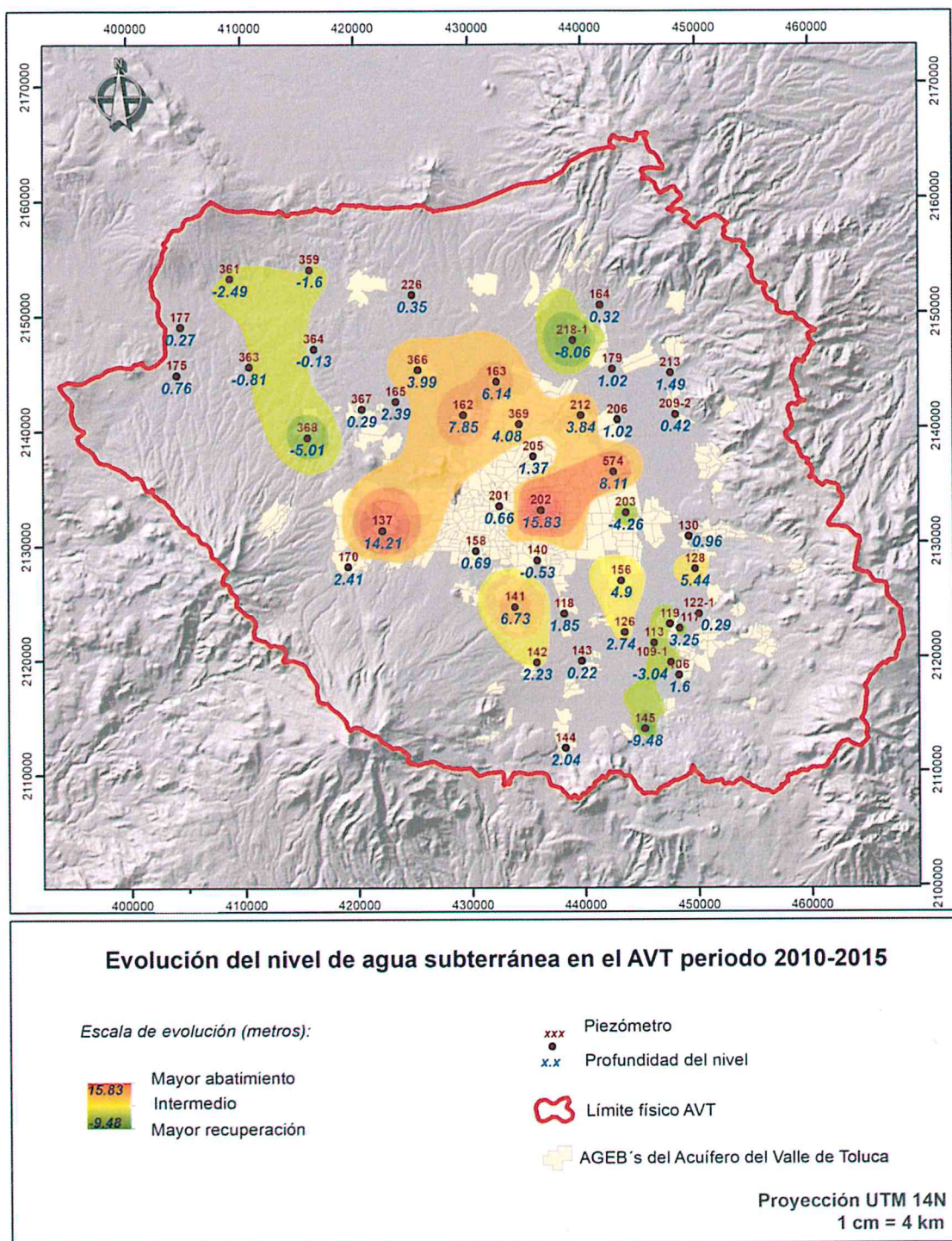


Figura 5.26 Evolución de los niveles de agua subterránea periodo 2010-2015 Acuífero del Valle de Toluca

5.2.5 Determinación de la recarga de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca

De los datos que se obtuvieron del paso anterior, de acuerdo con la metodología, de la división entre la suma total del volumen de roca drenada entre el área total del valle (la cual fue de 1,622,116,861.1 m²), resultó un abatimiento promedio de 1.51 m para el periodo 1984-1996 y un abatimiento promedio anual de 0.12 metros anuales para el mismo periodo. Mientras que para el periodo 2010-2015 resultó un abatimiento de 1.44 m y un abatimiento promedio anual de 0.28 metros anuales.

Al multiplicar el abatimiento promedio anual de cada periodo por el área total del Acuífero (la cual fue de 2,526,554 m²) se obtuvo el volumen de agua drenado del acuífero que fue de 319,698,442.22 m³ de agua para el primer periodo y 730,579,711.3 m³ para el segundo periodo. Al multiplicar el volumen drenado del acuífero entre el coeficiente de almacenamiento 0.045 se obtuvo el volumen de cambio de almacenamiento ($\pm \Delta S$) m³ el cual fue de 14,386,429.9 (14.40 Mm³) para el periodo 1984-1996 y de 32,876,087.0 m³ (32.87 Mm³) para el periodo 2010-2015.

Tomando como referencia el documento de Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero del Valle de Toluca (CONAGUA, 2015) la extracción para el primer periodo corresponde a 422.344 Mm³ y para el segundo periodo tomando como referencia el Censo 2009 (IMTA, 2009), la extracción fue de 474.36 Mm³. Al aplicar la ecuación de recarga (ec.6) que se presentó en el capítulo anterior para obtener la recarga de agua subterránea con el método de balance, se sustituyeron los valores para obtener la recarga total (E), despejando $E=S-\pm\Delta S$

En el periodo 1984-1996 resultó:

$$E = 422.344 \text{ Mm}^3 - 14.40 \text{ Mm}^3$$

$$E = 407.94 \text{ Mm}^3$$

En el periodo 2010-2015 resultó:

$$E = 474.36 \text{ Mm}^3 - 32.87 \text{ Mm}^3$$

$$E = 441.49 \text{ Mm}^3$$

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo, se ahonda la discusión sobre los resultados entre éste y otros proyectos sobre recarga de agua subterránea, se enuncian las ventajas y desventajas de la aplicación de los métodos de balance hídrico del suelo y del acuífero en la realización del presente trabajo. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones que se generaron a partir de este proyecto.

6.1 Discusión de resultados de trabajos previos

A continuación, en la tabla 6.1 se hace referencia a los resultados en materia de recarga de agua subterránea de trabajos previos.

Tabla 6.1 Tabla comparativa de resultados de trabajos de recarga de agua subterránea del AVT

Id	Título y autor	Año	Recarga
1	Estudio geohidrológico preliminar del valle de Toluca, Estado de México. Memoria descriptiva. ICATEC	1985	Volumen de recarga anual de 364 Hm ³ /año
2	Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de las Redes de Observación del Acuífero Valle de Toluca. Ariel Consultores S.A	1996	256 Mm ³ /año
3	Estado actual de las investigaciones hidrogeológicas en el Valle de Toluca, Mex. Elaborado para la Agencia Alemana de Cooperación técnica GTZ, dentro del marco de cooperación GTZ-CNA. Año 2004	2004	430 Hm ³ /año
4	Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero del Valle de Toluca (1501) Estado de México. CNA	2002	336.8 Hm ³ /año recarga total
5	Estimación de la recarga en el Acuífero del Valle de Toluca con la aplicación de un SIG. Febe Helia Ortiz Madrid	2010	Periodo de análisis 1993-2008 Recarga potencial total 375.52 Mm ³

Continuación:

Id	Título y autor	Año	Recarga
6	Pumping effects on land subsidence assessment using field data remote sensing and numerical modeling Tesis Doctoral Université du Quebec Institut national de la recherche scientifique, Quebec. Calderhead A,I	2009	Recarga 376 Mm ³ año (proyección a 2050 es igual a 361 Mm ³ año)
7	Determinación espacial de la recarga de un acuífero mediante el diseño e instalación e instrumentación en pozos de monitoreo y un modelo numérico unidimensional de la infiltración en la zona vadosa. Javier Salas García	2012	Recarga potencial equivalente a 218.03Mm ³
8	Jocelin Marina Sánchez Hernández	2019	Periodo 1984-1996, una recarga con el método hídrico del suelo de 564 Mm ³ y con el método del balance hídrico del acuífero de 407.94 Mm ³ . Periodo 2010-2015, recarga de 614 Mm ³ con el método hídrico del suelo y 441.49 Mm ³ con el método del balance hídrico del acuífero.

De acuerdo con la tabla anterior (6.1) se observa que: en el estudio 1) para el año 1985, se obtuvo una recarga de 364 Hm³/año, mediante el censo de 626 pozos y una extracción total anual de 413 Mm³; en el estudio 2) para el año 1996, se observa una recarga de 256 Mm³/año mediante el método de registros de los niveles del acuífero, en el mismo estudio se obtuvo la extracción equivalente a 342 Mm³/año

En el estudio 3) en el año 2004, con el método de coeficiente de infiltración se obtuvo una recarga equivalente a 430 Hm³/año; en el estudio 4) 336.8 Hm³/año de recarga total y 424.0 Mm³ de descarga; en el estudio 5) para el periodo de análisis 1993-2008, se obtuvo la recarga potencial total, equivalente a 375.52 Mm³ (precipitación 318.65 Hm³, cuerpos de agua 2.45 Hm³, fugas en redes 54.42 Hm³).

En el estudio 6) para el año 2009, se obtuvo una recarga de 376 Mm³ año y una proyección a 2050 equivalente a 361 Mm³ año, la recarga se determinó con los datos históricos del

clima, la predicción de cambio climático, los parámetros utilizados con el método HELP 3 (The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) y del año 1960 a 2012 se registró un abatimiento de 2 metros en el corredor industrial.

En el estudio 7) para el año 2012, la recarga potencial se determinó mediante: precipitación se calculó con los datos comprendidos entre el 1 de agosto de 2002 y 31 de julio de 2010 resultando 1,108 mm anuales en las partes altas y 713 mm anuales en el valle, ET_R menor en las zonas urbanas que en el valle central consecuencia de la menor cantidad de vegetación, la transpiración mayor en las zonas boscosas (Máximo= 868 mm, mínimo= 305mm y promedio= 586.5mm).

En el mismo trabajo, la relación escorrentía superficial y precipitación equivale a: $Q=17\%$ (Pozo Otzolotepec) $Q= 11\%$ (zona del Nevado), la recarga potencial se estimó en $218.03Mm^3$ mediante: 103 mm año multiplicados por el área $2,116.76 km^2$ (nota: el cálculo de escorrentía Q asume que las zonas de uso rural o urbano son agrícolas, y como consecuencia se observa una sobrestimación local de esas áreas entre 80 y 145 mm)

En el presente trabajo (estudio 8) los resultados fueron para el periodo comprendido entre 1984-1996, una recarga con el método hídrico del suelo de $564 Mm^3$ y con el método del balance hídrico del acuífero de $407.94 Mm^3$. Para el periodo comprendido entre 2010-2015, se estimó una recarga de $614 Mm^3$ con el método del balance hídrico del suelo y $441.49 Mm^3$ con el método del balance hídrico del acuífero.

6.2 Ventajas y desventajas

Finalmente, se presenta la tabla 6.2, que es una comparativa sobre las ventajas y las desventajas que se observaron en la realización de este proyecto al aplicar ambos métodos.

Tabla 6.2 Ventajas y desventajas de ambos métodos

Balance hídrico del suelo	Balance hídrico del acuífero
Recarga periodo 1984-1996 = 564 Mm ³	Recarga periodo 1984-1996 = 407.94 Mm ³
Recarga periodo 2010-2015 = 614 Mm ³	Recarga periodo 2010-2015 = 441.49 Mm ³
Menor recarga en el periodo 1984-1996 Mayor recarga en el periodo 2010-2015	Menor recarga en el periodo 1984-1996 Mayor recarga en el periodo 2010-2015
Influencia de la temporalidad	Influencia del marco conceptual
Influencia de la variabilidad climática	Influencia del medio geológico
Influencia de la metodología de interpolación	Influencia de las dinámicas hidrogeológicas
Influencia de los datos climatológicos que se tienen	Influencia de los datos de extracción

6.3 Conclusiones y recomendaciones

El adecuado entendimiento del sistema acuífero permite comprender los procesos que se dan a nivel subterráneo. En este trabajo se concluye que:

- i. El cálculo de la recarga de agua subterránea a partir de un método real y uno potencial, al arrojar resultados no comparables entre sí, permite visualizar y entender el sistema acuífero en un panorama más amplio, ya que los déficits de un método pueden complementar y, en algunos casos explicar, al otro método.
- ii. En el caso de los dos periodos aquí analizados se observó una mayor recarga potencial para el periodo comprendido entre 2010-2015 lo que destaca la importancia de la escala temporal (que en este periodo fue de 5 años) y la variabilidad climática, principalmente, para el método de balance hídrico del suelo, ya que al promediar temperatura, lluvia y evapotranspiración, sus valores resultan mayores que para el periodo comprendido entre 1984 y 1996 a pesar de ser menos años.

- iii. En cuanto a la interpolación de los datos climáticos se observa que hay métodos en los cuales se puede subestimar o sobreestimar los valores, por tanto, se debe elegir el método de interpolación que vaya más acorde con las características de la zona de estudio.
- iv. También influye el método para la determinación de la ET_0 . En este trabajo se utilizó el método de Thorntwaite, aunque por la cantidad de datos de temperatura con que se cuenta y la accesibilidad a los datos de Radiación solar, sería conveniente utilizar otros métodos por ejemplo el de Hargreaves-Samani.
- v. Es importante mencionar, acerca del cálculo de escurrimiento, usualmente se sigue la metodología que marca la NOM-011-CONAGUA-2015, es interesante considerar diferentes métodos para obtener el coeficiente de escurrimiento que sea más acorde con la zona de interés, para este proyecto se obtuvo mediante la metodología de Benítez *et al* (1980) donde se considera la pendiente (ya que el AVT se ubica en la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, por tanto tiene pendientes más escarpadas y una topografía más accidentada).
- vi. En futuros trabajos, se pueden considerar otros parámetros como la intercepción por follaje.
- vii. Así mismo, la influencia de los programas de reforestación y mantenimiento en el Nevado de Toluca, que de acuerdo con CONAFOR, desde 2013 se han favorecido 4,847 hectáreas como parte del programa especial de Restauración y Reversión Productiva Forestal en el Nevado de Toluca (CONAFOR, 2016); y de acuerdo con Gómez, G (2016) las áreas de frontera entre la zona forestal y agrícola no se modificaron de 2013 a 2015, sin embargo, aumentó el bosque lo que permitió mayor captación de agua. Es por este motivo que para el segundo periodo (2010-2015) aumentó la zona boscosa e impactó directamente a la infiltración.
- viii. En cuanto al método de balance hídrico del acuífero es importante considerar que ya existen estudios previos de cálculo de la recarga mediante este método para este

acuífero, tal es el caso del estudio de la Disponibilidad media anual en el Acuífero del Valle de Toluca elaborado por CONAGUA, que se ha ido actualizando con los años (desde 1970-2015). Es una realidad que herramientas como los SIG, coadyuvan y mejoran la obtención, la generación y el análisis de la información. Comparando los resultados del estudio de 1996 y el resultado de este proyecto para ese mismo periodo se observa una diferencia en el volumen de recarga de agua subterránea mayor a 100 Mm³ y al analizar los datos se comprueba que difieren en área, extracción y precipitación. Hay que tener en consideración que hoy en día se pueden hacer estudios retrospectivos con más datos a mayor detalle.

- ix. A partir de la recopilación, síntesis, análisis y tratamiento de la información disponible en este proyecto de tesis se ha logrado:
 - Sintetizar la información de la zona de estudio para su caracterización.
 - Un mayor entendimiento del Acuífero del Valle de Toluca a partir de su caracterización y la integración del Marco teórico del presente estudio.

- x. Utilizar diversos métodos para la estimación de la recarga, ya que dan un panorama más detallado de los resultados y en este caso, ambos métodos se complementan uno al otro.

- xi. La principal recomendación de este trabajo es que, para estimar la recarga de agua subterránea, hay que tener claros los insumos, dependiendo de la metodología que se utiliza, ya que, en el caso del método de balance hídrico del suelo la variabilidad climática y temporal juegan un rol muy importante, mientras que, para el método del balance hídrico del acuífero, es el adecuado marco conceptual.

Referencias bibliográficas

- Almorox, J. (2004) *Métodos de estimación de las evapotranspiraciones ET_p y ET_r* . Universidad Politécnica de Madrid.
- AMC (2010). *El Agua en México: Cauces y encauces*. México, CDMX: Academia Mexicana de Ciencias.
- ANU (2013) *ANUSPLIN User guide*. Canberra, Australia
- Ariel Consultores S.A (1996) *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación del acuífero del valle de Toluca*. CNA
- Benítez, C., Arias, W., Quiroz, J. (1980) *Manual de conservación de suelos y aguas*, Ministerio de Agricultura y Alimentación, Lima, Perú
- Calderhead A.I (2009) *Pumping effects on land subsidence: assessment using field data remote sensing and numerical modeling*. Tesis de Doctorado Université du Québec Institut national de la recherche scientifique, Québec.
- CAP-net (2010) *Gestión de aguas subterráneas en la GIRH*. Manual de capacitación, Africa.
- Castany, G (1971) *Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas*". Ed. Omega, Barcelona, España
- CONABIO (1998) *Datos vectoriales de precipitación*. Descarga del geoportal de CONABIO <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> Consultado el 03-08-2017
- CONAFOR Prensa (2016) Reforesta CONAFOR 680 hectáreas en el Nevado de Toluca (en www.gob.mx Comisión Nacional Forestal Consultado el 15 enero 2019))
- CONAGUA. (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero del Valle de Toluca, Estado de México*. Toluca, Estado de México.
- CONAGUA-GTZ (2008) *Modelo de simulación hidrodinámica del Acuífero del Valle de Toluca, Estado de México. Dentro del proyecto "Plan de Manejo Integral del Acuífero del Valle de Toluca"*. Reporte Interno. México, CDMX
- CONAGUA. (2009). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea Acuífero 1501 Valle de Toluca Estado de México*. Toluca, Estado de México: Diario Oficial de la Federación 28 de agosto de 2009.
- CONAGUA. (2015). *Preservación y recuperación de acuíferos en México*. CDMX: Subdirección General de Administración del Agua.
- CONAGUA-SEMARNAT. (2016). *Atlas del agua en México, 2016*. CDMX: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAPO. (2017). *Datos de proyecciones de población 2010-2050*. CDMX: Consejo Nacional de Población. Recuperado el 20 de 04 de 2017, de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/proyecciones_Datos

Custodio, E; Llamas, M. (1976) *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega Barcelona, España

Dávila, N., Madrigal, D., & Avalos, D. (2015). *Aplicación de Técnicas de Interferometría Radar INSAR en el análisis espacial de subsidencias en el Valle de México*. *Ciencias Espaciales Volumen 8 Número 1*. doi:<http://dx.doi.org/10.5377/ce.v8i1.2054>

DOF (2015) *Norma Oficial Mexicana NOM-011 CONAGUA-2015 Conservación del Recurso Agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. CDMX: Diario Oficial de la Federación -Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

DOF (2016) *Norma Oficial Mexicana NOM-011 CONAGUA-2016 Ley de aguas nacionales*. DMX: Diario Oficial de la Federación -Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Eastman, R. (2015). *IDRISI Selva. Guía para SIG y Procesamiento de imágenes*. Clark University. Massachusetts, Estados Unidos.

Expósito, J.L. (2012) *Características hidrodinámicas e hidroquímicas del Acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea*. Tesis de Doctorado en Ciencias del Agua . Toluca, Estado de México: Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

Earth explorer USGS *Imágenes SRTM 1 Arc Second Global* Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Acceso 20/02/2017)

ESRI, España. (2012) Disponible en: <http://www.esri.es/es/formacion/que-es-un-sig/> (Acceso 05/08/2017)

FAO (2016). *Global Diagnostic of Groundwater Governance. A Global Framework for action*. Roma, Italia: The Project Steering Committee.

FAO-Water. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Roma, Italia: FAO.

Fonseca, O. R (2014) *Sistemas de modelos termohidrológicos de evaluación de eficiencia y optimación en asignación de recursos hídricos*. Toluca, Estado de México: Centro Interamericano de Recursos del Tesis de Doctorado en Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

Franco, P.R (2008) *Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de los recursos hídricos*. Toluca, Estado de México: Centro

Interamericano de Recursos del Tesis de Doctorado en Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

Freeze, A; Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Waterloo Canadá: Waterloo University.

Foster, H. S., D.D'Elia, G., & Paris, M. (2002). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, DC, Estados Unidos: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/ Banco Mundial.

Gómez A. *et al* *Conjunto de datos vectoriales de clima México 1960-2000*. Toluca, México

Guerrero, L. (2016). *Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación*. Aguascalientes, México: Centro de Ciencias del Diseño y la Construcción. Departamento de Geotencia e Hidráulica. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Gómez, G (2016) *Recuperan 8 mil hectáreas de bosque en el Nevado de Toluca. Laboratorio de Análisis Geoespacial*. Universidad Autónoma de México. Ciudad de México

Healy W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985) *Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agriculture* Tomado de Sánchez San Román Javier, Dpto. Geología Univ. Salamanca el 20-01-2017 en <http://hidrologia.usal.es/>

ICATEC (1985) *Estudio geohidrológico preliminar del valle de Toluca, Estado de México*. Memoria descriptiva

IFOMEGEM. (1994). *Carta geológica del Estado de México*. Ciudad de México: Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México.

INEGI (2014) *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II*. Descarga del Geoportal de CONABIO <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> el 12-07-17

INEGI (2015) *Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación escala 1:250,000 Serie V*. Aguascalientes, México

INEGI (2016) *Conjunto de datos vectoriales. Cartografía geoestadística urbana 1:250,000* Aguascalientes, México

Instituto de Hidrología de España-UNESCO. (1981). *Métodos de cálculo de balance hídrico N°17*. Madrid, España: UNESCO.

López V.S (2018) *Estrategias para la protección de manantiales: propuesta metodológica de acuerdo al entorno físico-social y proyección de escenarios*. Toluca, Estado de México:

Centro Interamericano de Recursos del Tesis de Doctorado en Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

NOAA (2017) *Water cycle* Disponible en: <http://www.noaa.gov/resource-collections/water-cycle> (Acceso 13-09-17)

Ordoñez, R. (2015). *Modelo espacio-temporal del desfase y amplitud de la variabilidad climática en la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago*. Toluca, Estado de México: Centro Interamericano de Recursos del Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

Ortiz, F. (2010). *Estimación de la recarga en el acuífero del Valle de Toluca con la aplicación de SIG*. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Toluca, Estado de México: Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

SAGARPA. (2012). *Hidrología Aplicada a las pequeñas obras hidráulicas*. México: Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

Salas, J. (2012). *Determinación espacial de la recarga en un acuífero mediante el diseño e instalación de instrumentación en pozos de monitoreo y un modelo numérico unidimensional de la infiltración*. Tesis de Maestría. Toluca, Estado de México: Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

SEDENA (2015) Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:1000000 Descargado en el portal www.sedena.gob.mx/dgcart.html. Consultado el 20-08-2017

Scalon B; Healy R; Cook P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hidrology Journal*, Vol 10:18–39

Schicht, R. J., y Walton, W. C. (1961). *Hydrologic budget for three small watersheds in Illinois*. Illinois, Estados Unidos: State Water Survey Report Invest 40.

Schwartz F; Ibaraki M. (2011). Groundwater: a resource in decline. *Elements. The source of water derived from wells Civ. Eng 10*, 10-20.

Shulz J; García F. (2015). *Balance hídrico y recarga de acuíferos*. Chile: Asociación Internacional de Hidrogeólogos, grupo Chileno.

SME. (2012). *Water in Mineral Resources processing*. Estados Unidos: Society for Mining Metalurgy and Extraction-Adam Craft circle U.S Geological Survey.

The CGIAR Consortium for Espatial Information (2004-2018) Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (Acceso 20-02-17)

UNESCO. (1991) *Agua subterránea. Gestión del Recurso Invisible*. Notas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Paris, Francia

UNESCO (2012) *Glosario Hidrológico Internacional*. World Meteorological Organization, Ginebra, Suiza.

UNESCO. (2015). *Agua para un mundo sostenible, datos y cifras*. Perusa, Italia: Secretaría del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos División de Ciencias del Agua.

USGS. (s.f.). *Groundwater Resources Program. Methods for estimating groundwater recharge*. U.S Geological Survey, Groundwater Resources. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <https://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/>

USGS (2017) *Water Science School*. Disponible en:
<https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html> (Acceso 13-08-17)

Vélez, M; Vásquez L. (2004). *Métodos para determinar la recarga de acuíferos*. (pág. 20). Medellín, Colombia: Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología.

ANEXOS

A.1 Diagnóstico de funcionamiento de los multipiezómetros

Id	MULTIPIEZOMETRO	X			Y			Z			Diagnóstico 1970-2017
106	PL-106 Almoloya del Rio	448358.6975	2118457.182	2571.3	448358.6975	2118457.182	2571.3	448358.6975	2118457.182	2571.3	Funciona
109-1	PL-109-1 Rancho el Pastor	447654.9744	2119565.661	2572.3	447654.9744	2119565.661	2572.3	447654.9744	2119565.661	2572.3	Parcialmente funciona
113	PL-113 Casco Hacienda Atenco	446176.2546	2121291.144	2573.9	446176.2546	2121291.144	2573.9	446176.2546	2121291.144	2573.9	Funciona
117	PL-117 Panteón Sn. Pedro Tlaltizapan	448437.3861	2122550.963	2574.9	448437.3861	2122550.963	2574.9	448437.3861	2122550.963	2574.9	Funciona
118	PL-118, San Mateo Mexicaltzingo	438235.1319	2123870.354	2604.1	438235.1319	2123870.354	2604.1	438235.1319	2123870.354	2604.1	Parcialmente funciona
119	PL-119, Zócalo Sn. Pedro Tlaltizapan	447553.6529	2122946.888	2575	447553.6529	2122946.888	2575	447553.6529	2122946.888	2575	Funciona
120-1	PL-120-1, Rancho las Palomas La Gloria Pozo 24 D.D.F	449877.9784	2122866.618	2575.3	449877.9784	2122866.618	2575.3	449877.9784	2122866.618	2575.3	No funciona
122-1	PL-122-1, Ejido Capulhuac	450122.9465	2123815.685	2572.8	450122.9465	2123815.685	2572.8	450122.9465	2123815.685	2572.8	Funciona
126	PL-126, Ganadería Atenco Oeste de la Hacienda Atenco	443597.336	2122220.973	2573.6	443597.336	2122220.973	2573.6	443597.336	2122220.973	2573.6	Funciona
128	PL-128, Rancho Tabachin. Hoy Rancho El Carmen	449797.8587	2127726.173	2571.6	449797.8587	2127726.173	2571.6	449797.8587	2127726.173	2571.6	Funciona
130	PL-130, San Pedro Cholula	449262.7633	2130583.023	2573.2	449262.7633	2130583.023	2573.2	449262.7633	2130583.023	2573.2	Funciona
137	PL-137, San Matías Transfiguración	422298.3622	2131181.986	2770.4	422298.3622	2131181.986	2770.4	422298.3622	2131181.986	2770.4	Parcialmente funciona
140	PL-140, Metepec	435903.6191	2128528.803	2628.1	435903.6191	2128528.803	2628.1	435903.6191	2128528.803	2628.1	No funciona
141	PL-141, Sta. María Nativitas	433927.0768	2124469.384	2694	433927.0768	2124469.384	2694	433927.0768	2124469.384	2694	Funciona
142	PL-142, Calimaya	435811.0348	2119603.256	2669.2	435811.0348	2119603.256	2669.2	435811.0348	2119603.256	2669.2	Funciona
143	PL-143, San Antonio la Isla	439792.5711	2119721.93	2586.6	439792.5711	2119721.93	2586.6	439792.5711	2119721.93	2586.6	Parcialmente funciona
144	PL-144, Tenango de Arista	438283.233	2112107.465	2599.9	438283.233	2112107.465	2599.9	438283.233	2112107.465	2599.9	Funciona
145	PL-145, San Pedro Techuiculco	445292.2742	2113760.416	2573.3	445292.2742	2113760.416	2573.3	445292.2742	2113760.416	2573.3	Funciona

156	PL-156, San Lucas Tunco	443301.7653	2126740.093	2573.9	Funciona
158	PL-158,Capultitlan	430479.5504	2129378.533	2705.9	No funciona
162	PL-162, San Pablo Autopan	429459.8094	2141203.965	2608.8	Funciona
163	PL-163, San Diego Linares	432417.2774	2144112.752	2585.8	Funciona
164	PL-164, San Agustín de los Mimbres, Otzolotepec	441597.932	2150750.759	2617	Funciona
165	PL-165, San Isidro Km. 14,900 de la carretera Toluca	423542.3367	2142395.956	2626.4	Funciona
166	PL-166, Ex-Hacienda del Rio Almoloya de Juárez	421744.3342	2151625.033	2563.5	Parcialmente funciona
170	PL-170, Desviación a Tepejalpa Zinacantepec	419254.4058	2128038.444	2880.5	Funciona
171	PL-171, La Puerta Zinacantepec	413099.1954	2123618.889	3117.1	No funciona
175	PL-175, Ejido de la Laguna Almoloya de Juárez	404230.3541	2144814.579	2601.8	Funciona
176	PL-176, La Unión de Ocoyotepec	410911.1895	2153264.432	2566.6	No funciona
177	PL-177, Entrar al Valle Bajo Ejido del Hospital Villa	404616.9918	2148990.011	2575.6	Funciona
179	PL-179, Rancho la Manga Xonacatlán	442659.1607	2145183.989	2572.3	Funciona
201	PL-201, Jardín Reforma Toluca	432581.3031	2133280.385	2642.9	Funciona
202	PL-202, AUTOMEX Toluca	436266.2826	2132895.213	2610.1	Funciona
203	PI-203, COLORQUIM, S.A. Toluca	443757.9885	2132670.779	2572.9	Funciona
205	PL-205, Km. 58+500 Dos Pinos Toluca - San Bartolo	435602.7981	2137584.913	2601	Funciona
206	PL-206, Margen Izquierda, Rio Lerma Otzolotepec	443082.7825	2140756.571	2569.9	Funciona
209-2	PL-209-2, Poste 177 y Lavaderos Sn. Nicolás Peralta	448160.4136	2141202.413	2575.1	Funciona
212	PL. 212 Carr. Naucalpan-Toluca Km. 53, México	439845.6499	2141135.847	2576.6	Funciona
213	PL-213 Carretera Amomolulco Sta. María Tlalimimilolpan	447733.263	2144830.542	2579.9	Funciona

218-1	PE-218-1, Poste 414 Sta. María Tetitla Hacienda Buena	439196.6157	2147684.973	2583.2	Parcialmente funciona
225	PL-225, Temoaya.	437609.2907	2152516.114	2660.4	No funciona
226	PL-226, Rancho Rosalinda II Temoaya	425039.5435	2151703.27	2573.6	Funciona
229	PL-229 San Diego Alcalá			2571.6	No funciona
369	PL-359, San Agustín Citlalli Almoloya de Juárez	416010.7975	2153925.446	2555	Parcialmente funciona
361	PL-361, Hacienda Tabernillas Almoloya de Juárez	408983.4733	2153172.613	2598.8	Funciona
362	PL-362, Ejido El Cerrillo, Almoloya de Juárez	409716.9893	2148840.873	2589.1	No funciona
363	PL-363, Cieneguillas Almoloya de Juárez	410630.7634	2145488.875	2588.2	Parcialmente funciona
364	PL-364, San Diego Almoloya de Juárez	416372.4522	2147022.969	2595.5	Funciona
366	PL-366, Santa Elena Camino a Cerrillos, Toluca	425508.2647	2145154.171	2601.7	Funciona
367	PL-367, Almoloya Poblado Almoloya de Juárez	420563.8976	2141763.255	2606.4	Funciona
368	PL-368, El Pino Almoloya de Juárez	415767.9694	2139325.82	2639.8	Parcialmente funciona
369	PL-369, San Pedro Toltepec, Toluca	434387.3468	2140386.324	2592.9	Funciona
574	PL-574, Cerrillos	442689.2761	2136239.533	2580	Funciona

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, 1960-2017

A.2 Configuración de profundidad de nivel y evolución del periodo 1984-1996

Id	MULTIPIEZOMETRO	X				Y				Z				NF96	E84_96
		X	Y	Z	N184	X	Y	Z	N184	X	Y	Z	N184		
106	PL-106 Almoloya del Rio	448358.6975	2118457.182	2571.3	15.64	448358.6975	2118457.182	2571.3	15.64	448358.6975	2118457.182	2571.3	15.64	20.48	4.84
109-1	PL-109-1 Rancho el Pastor	447654.9744	2119565.661	2572.3	20.97	447654.9744	2119565.661	2572.3	20.97	447654.9744	2119565.661	2572.3	20.97	21.89	0.92
113	PL-113 Casco Hacienda Atenco	446176.2546	2121291.144	2573.9	7.86	446176.2546	2121291.144	2573.9	7.86	446176.2546	2121291.144	2573.9	7.86	16.43	8.57
117	PL-117 Panteón Sn. Pedro Tlaltizapan	448437.3861	2122550.963	2574.9	19.88	448437.3861	2122550.963	2574.9	19.88	448437.3861	2122550.963	2574.9	19.88	20.48	0.6
118	PL-118, San Mateo Mexicaltzingo	438235.1319	2123870.354	2604.1	3.5	438235.1319	2123870.354	2604.1	3.5	438235.1319	2123870.354	2604.1	3.5	8.59	5.09
119	PL-119, Zócalo Sn. Pedro Tlaltizapan	447553.6529	2122946.888	2575	24.13	447553.6529	2122946.888	2575	24.13	447553.6529	2122946.888	2575	24.13	23.02	-1.11
120-1	PL-120-1, Rancho las Palomas La Gloria Pozo 24 D.D.F	449877.9784	2122866.618	2575.3	27.11	449877.9784	2122866.618	2575.3	27.11	449877.9784	2122866.618	2575.3	27.11	26.93	-0.18
122-1	PL-122-1, Ejido Capulhuac	450122.9465	2123815.685	2572.8	14.58	450122.9465	2123815.685	2572.8	14.58	450122.9465	2123815.685	2572.8	14.58	12.37	-2.21
126	PL-126, Ganadería Atenco Oeste de la Hacienda Atenco	443597.336	2122220.973	2573.6	5.5	443597.336	2122220.973	2573.6	5.5	443597.336	2122220.973	2573.6	5.5	6.71	1.21
128	PL-128, Rancho Tabachin. Hoy Rancho El Carmen	449797.8587	2127726.173	2571.6	31.98	449797.8587	2127726.173	2571.6	31.98	449797.8587	2127726.173	2571.6	31.98	36.63	4.65
130	PL-130, San Pedro Cholula	449262.7633	2130583.023	2573.2	24.56	449262.7633	2130583.023	2573.2	24.56	449262.7633	2130583.023	2573.2	24.56	25.65	1.09
137	PL-137, San Matías Transfiguración	422298.3622	2131181.986	2770.4	33.22	422298.3622	2131181.986	2770.4	33.22	422298.3622	2131181.986	2770.4	33.22	36.92	3.7
140	PL-140, Metepec	435903.6191	2128528.803	2628.1	27.41	435903.6191	2128528.803	2628.1	27.41	435903.6191	2128528.803	2628.1	27.41	39.93	12.52
141	PL-141, Sta. María Nativitas	433927.0768	2124469.384	2694	72.54	433927.0768	2124469.384	2694	72.54	433927.0768	2124469.384	2694	72.54	81.6	9.06
142	PL-142, Calimaya	435811.0348	2119603.256	2669.2	59.78	435811.0348	2119603.256	2669.2	59.78	435811.0348	2119603.256	2669.2	59.78	63.2	3.42
143	PL-143, San Antonio la Isla	439792.5711	2119721.93	2586.6	2.33	439792.5711	2119721.93	2586.6	2.33	439792.5711	2119721.93	2586.6	2.33	6.89	4.56
144	PL-144, Tenango de Arista	438283.233	2112107.465	2599.9	20.66	438283.233	2112107.465	2599.9	20.66	438283.233	2112107.465	2599.9	20.66	27.55	6.89
145	PL-145, San Pedro Techululco	445292.2742	2113760.416	2573.3	28.31	445292.2742	2113760.416	2573.3	28.31	445292.2742	2113760.416	2573.3	28.31	29.76	1.45
156	PL-156, San Lucas Tunco	443301.7653	2126740.093	2573.9	5.31	443301.7653	2126740.093	2573.9	5.31	443301.7653	2126740.093	2573.9	5.31	9.85	4.54

158	PL-158, Capultitlán	430479.5504	2129378.533	2705.9	85.24	89.25	4.01
162	PL-162, San Pablo Autopan	429459.8094	2141203.965	2608.8	27.57	34.12	6.55
163	PL-163, San Diego Linares	432417.2774	2144112.752	2585.8	30.8	24.2	-6.6
164	PL-164, San Agustín de los Mimbres, Otzolotepec	441597.932	2150750.759	2617	65.77	64.99	-0.78
165	PL-165, San Isidro Km. 14.900 de la carretera Toluca	423542.3367	2142395.956	2626.4	40.24	42.3	2.06
166	PL-166, Ex-Hacienda del Río Almoloya de Juárez	421744.3342	2151625.033	2563.5	33.51	28.79	-4.72
170	PL-170, Desviación a Tepejalpa Zinacantepec	419254.4058	2128038.444	2880.5	81.65	91.88	10.23
171	PL-171, La Puerta Zinacantepec	413099.1954	2123618.889	3117.1			
175	PL-175, Ejido de la Laguna Almoloya de Juárez	404230.3541	2144814.579	2601.8	-0.42	-0.03	0.39
176	PL-176, La Unión de Ocoyotepec	410911.1895	2153264.432	2566.6			
177	PL-177, Entrar al Valle Bajó Ejido del Hospital Villa	404616.9918	2148990.011	2575.6	6.79	6.39	-0.4
179	PL-179, Rancho la Manga Xonacatlán	442659.1607	2145183.989	2572.3	32.88	31.68	-1.2
201	PL-201, Jardín Reforma Toluca	432581.3031	2133280.385	2642.9	51.42	63.35	11.93
202	PL-202, AUTOMEX Toluca	436266.2826	2132895.213	2610.1	35.27	35.3	0.03
203	PI-203, COLORQUIM, S.A. Toluca	443757.9885	2132670.779	2572.9	9.37	10.58	1.21
205	PL-205, Km. 58+500 Dos Pinos Toluca - San Bartolo	435602.7981	2137584.913	2601	25.28	36.72	11.44
206	PL-206, Margen Izquierda, Río Lerma Otzolotepec	443082.7825	2140756.571	2569.9	15.73	15.87	0.14
209-2	PL-209-2, Poste 177 y Lavaderos Sn. Nicolás Peralta	448160.4136	2141202.413	2575.1	35.64	33.88	-1.76
212	PL-212 Carr. Naucalpan-Toluca Km. 53, México	439845.6499	2141135.847	2576.6	10.48	13.22	2.74
213	PL-213 Carretera Amomuloco Sta. María Tlalmimilolpan	447733.263	2144830.542	2579.9	9.1	11.41	2.31
218-1	PE-218-1, Poste 414 Sta. María Tetitla Hacienda Buena	439196.6157	2147684.973	2583.2	46.27	44.63	-1.64

225	PL-225, Temoaya.	437609.2907	2152516.114	2660.4	48.12	50.28	2.16
226	PL-226, Rancho Rosalinda II Temoaya	425039.5435	2151703.27	2573.6	14.3	16.1	1.8
229	PL-229 San Diego Alcala			2571.6	13.37	14.85	1.48
369	PL-359, San Agustín Citlialli Almoloya de Juárez	416010.7975	2153925.446	2555	32.72	25.53	-7.19
361	PL-361, Hacienda Tabermillas Almoloya de Juárez	408983.4733	2153172.613	2598.8			
362	PL-362.Ejido El Cerrillo, Almoloya de Juárez	409716.9893	2148840.873	2589.1	29.01	28.76	-0.25
363	PL-363, Cieneguillas Almoloya de Juárez	410630.7634	2145488.875	2588.2	10.2	10.79	0.59
364	PL-364, San Diego Almoloya de Juárez	416372.4522	2147022.969	2595.5	37.95	36.56	-1.39
366	PL-366, Santa Elena Camino a Cerrillos, Toluca	425508.2647	2145154.171	2601.7	25.76	25.93	0.17
367	PL-367, Almoloya Poblado Almoloya de Juárez	420563.8976	2141763.255	2606.4	17.33	17.5	0.17
368	PL-368, El Pino Almoloya de Juárez	415767.9694	2139325.82	2639.8	19.66	22.33	2.67
369	PL-369, San Pedro Toltepec, Toluca	434387.3468	2140386.324	2592.9	14.81	21.43	6.62
574	PL-574, Cerrillos	442689.2761	2136239.533	2580			

A.3 Tabla de configuración de profundidad de nivel y evolución del periodo 2010-2015

Id	MULTIPIEZOMETRO	X					Y					Z					NF15	E10_15				
106	PL-106 Almoloya del Rio	448358.698					2118457.18					2571.3				17.16			18.76			1.6
109-1	PL-109-1 Rancho el Pastor	447654.974					2119565.66					2572.3				21.54			18.5			-3.04
113	PL-113 Casco Hacienda Atenco	446176.255					2121291.14					2573.9				17.29			15.73			-1.56
117	PL-117 Panteón Sn. Pedro Tlaltizapan	448437.386					2122550.96					2574.9				25.7			28.95			3.25
118	PL-118, San Mateo Mexicaltzingo	438235.132					2123870.35					2604.1				14.47			16.32			1.85
119	PL-119, Zócalo Sn. Pedro Tlaltizapan	447553.653					2122946.89					2575				23.31			19.74			-3.57
120-1	PL-120-1, Rancho las Palomas La Gloria Pozo 24 D.D.F	449877.978					2122866.62					2575.3										
122-1	PL-122-1, Ejido Capulhuac	450122.946					2123815.69					2572.8				11.9			12.19			0.29
126	PL-126, Ganadería Atenco Oeste de la Hacienda Atenco	443597.336					2122220.97					2573.6				7.3			10.04			2.74
128	PL-128, Rancho Tabachin. Hoy Rancho El Carmen	449797.859					2127726.17					2571.6				26.62			32.06			5.44
130	PL-130, San Pedro Cholula	449262.763					2130583.02					2573.2				34.93			35.89			0.96
137	PL-137, San Matías Transfiguración	422298.362					2131181.99					2770.4				39.16			53.37			14.21
140	PL-140, Metepec	435903.619					2128528.8					2628.1				36.53			36			-0.53
141	PL-141, Sta. María Nativitas	433927.077					2124469.38					2694				86.31			93.04			6.73
142	PL-142, Calimaya	435811.035					2119603.26					2669.2				65.42			67.65			2.23
143	PL-143, San Antonio la Isla	439792.571					2119721.93					2586.6				1.08			1.3			0.22
144	PL-144, Tenango de Arista	438283.233					2112107.47					2599.9				29.81			31.85			2.04
145	PL-145, San Pedro Techuchulco	445292.274					2113760.42					2573.3				20.62			11.14			-9.48
156	PL-156, San Lucas Tunco	443301.765					2126740.09					2573.9				14.31			19.21			4.9

158	PL-158,Capultitlan	430479.55	2129378.53	2705.9	85.91	86.6
162	PL-162, San Pablo Autopan	429459.809	2141203.97	2608.8	37.01	44.86
163	PL-163, San Diego Linares	432417.277	2144112.75	2585.8	17.58	23.72
164	PL-164, San Agustín de los Mimbres, Oztolotepec	441597.932	2150750.76	2617	69.97	70.29
165	PL-165, San Isidro Km. 14.900 de la carretera Toluca	423542.337	2142395.96	2626.4	42.79	45.18
166	PL-166, Ex-Hacienda del Río Almoloya de Juárez	421744.334	2151625.03	2563.5		
170	PL-170, Desviación a Tepejalpa Zinacantepec	419254.406	2128038.44	2880.5	98.83	101.24
171	PL-171, La Puerta Zinacantepec	413099.195	2123618.89	3117.1		Fluye
175	PL-175, Ejido de la Laguna Almoloya de Juárez	404230.354	2144814.58	2601.8	-0.01	0.75
176	PL-176, La Unión de Ocoyotepec	410911.19	2153264.43	2566.6		
177	PL-177, Entrar al Valle Bajo Ejido del Hospital Villa	404616.992	2148990.01	2575.6	4.39	4.66
179	PL-179, Rancho la Manga Xonacatlán	442659.161	2145183.99	2572.3	33.99	35.01
201	PL-201, Jardín Reforma Toluca	432581.303	2133280.39	2642.9	70.8	71.46
202	PL-202, AUTOMEX Toluca	436266.283	2132895.21	2610.1	54.59	70.42
203	PL-203, COLORQUIM, S.A. Toluca	443757.989	2132670.78	2572.9	14.99	10.73
205	PL-205, Km. 58+500 Dos Pinos Toluca - San Bartolo	435602.798	2137584.91	2601	56.3	57.67
206	PL-206, Margen Izquierda, Río Lerma Oztolotepec	443082.783	2140756.57	2569.9	18.71	19.73
209-2	PL-209-2, Poste 177 y Lavaderos Sn. Nicolás Peralta	448160.414	2141202.41	2575.1	37.84	38.26
212	PL. 212 Carr. Naucalpan-Toluca Km. 53, México	439845.65	2141135.85	2576.6	20.25	24.09
213	PL-213 Carretera Amomolulco Sta. María Tlalmimilolpan	447733.263	2144830.54	2579.9	38.67	40.16
218-1	PE-218-1, Poste 414 Sta. María Teitila Hacienda Buena	439196.616	2147684.97	2583.2	8.18	0.12

225	PL-225, Temoaya.	437609.291	2152516.11	2660.4	17.97	18.32	0.35
226	PL-226, Rancho Rosalinda II Temoaya	425039.544	2151703.27	2573.6			
229	PL-229 San Diego Alcala			2571.6			
369	PL-359, San Agustín Citlalli Almoloya de Juárez	416010.797	2153925.45	2555	23.92	22.32	-1.6
361	PL-361, Hacienda Tabernillas Almoloya de Juárez	408983.473	2153172.61	2598.8	17.97	0.04	-17.93
362	PL-362 Ejido El Cerrillo, Almoloya de Juárez	409716.989	2148840.87	2589.1			
363	PL-363 Cieneguillas Almoloya de Juárez	410630.763	2145488.88	2588.2	10.86	10.05	-0.81
364	PL-364, San Diego Almoloya de Juárez	416372.452	2147022.97	2595.5	36.46	36.33	-0.13
366	PL-366, Santa Elena Camino a Cerrillos, Toluca	425508.265	2145154.17	2601.7	36.96	40.95	3.99
367	PL-367, Almoloya Poblado Almoloya de Juárez	420563.898	2141763.25	2606.4	18.41	18.7	0.29
368	PL-368, El Pino Almoloya de Juárez	415767.969	2139325.82	2639.8	25.43	20.42	-5.01
369	PL-369. San Pedro Toltepec, Toluca	434387.347	2140386.32	2592.9	29.56	33.64	4.08
574	PL-574, Cerrillos	442689.276	2136239.53	2580	25.4	33.51	8.11